REGIONE LIGURIA
Dipartimento Ambiente

MANUALE TECNICO - IL CONTROLLO DEGLI SPOSTAMENTI ORIZZONTALI IN PROFONDITA’ MEDIANTE TUBI INCLINOMETRICI E SONDA REMOVIBILE.

MODALITÀ DI INSTALLAZIONE, REQUISITI TECNICI DELLA STRUMENTAZIONE, ESECUZIONE LETTURE, PRESENTAZIONE DEI DATI, INTERPRETAZIONE E INDIVIDUAZIONE DEGLI ERRORI SISTEMATICI

INDICE

1. Premessa ed obiettivi del documento

Nel campo del monitoraggio geotecnico l'utilizzo della strumentazione inclinometrica, per la misura di movimenti orizzontali nei terreni e negli ammassi, rappresenta un sistema consolidato nel tempo ed estremamente diffuso, che permette di ottenere misure di elevata precisione, ad un elevato grado di affidabilità, relativamente a profondità, direzione e velocità di scorrimento di una massa di terreno instabile.

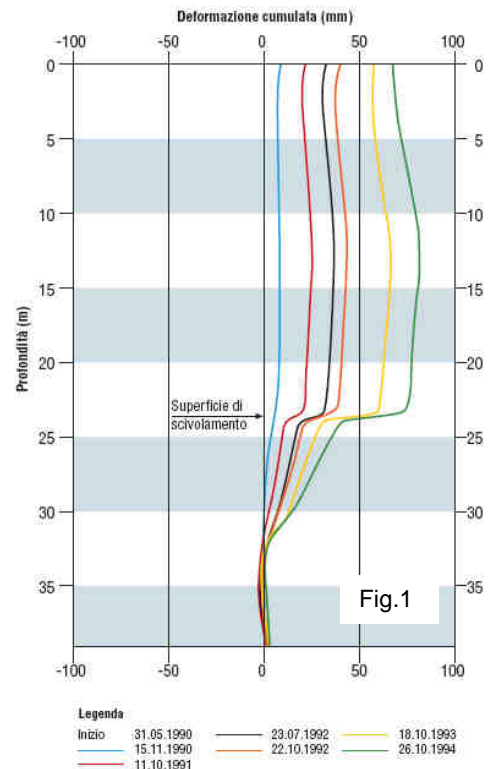
Lo svolgimento di una misura inclinometrica risulta, in genere, come un'operazione manuale alquanto semplice, ed allo stesso modo le letture rappresentate mediante grafici, prodotti in "automatico" da specifici software applicativi, risultano in genere di immediata visualizzazione e comprensione - come ad esempio nel caso della figura 1 che mostra la presenza di uno spostamento a circa -24 metri dal p.c -.

Fig.1

Al riguardo esiste un'ampia bibliografia scientifica circa l'utilizzo della strumentazione inclinometrica nonché diverse normative e raccomandazioni di riferimento (ISRM, ASTM, AGI, ANISIG,…) che vengono frequentemente richiamate nella redazione delle norme tecniche dei capitolati d'appalto nei lavori di indagine geotecnica.

E' anche vero, però, che, a causa di una non corretta installazione della tubazione inclinometrica, delle modalità di esecuzione delle misure, di problemi di taratura della sonda removibile i grafici inclinometrici possono risultare di ambigua interpretazione, conducendo ad errate valutazioni circa l'entità, in valore assoluto degli spostamenti rilevati. Da ciò possono conseguire, così, incertezze nella valutazione della pericolosità geomorfologica di un sito, qualora sia in corso una campagna di monitoraggio geotecnica, ovvero un non corretto approccio nella risoluzione dei problemi

Affinché la misura inclinometrica risulti effettivamente accurata, e pertanto sia significativa ed affidabile, occorre che gli operatori chiamati a svolgere le diverse fasi di installazione, di lettura e di analisi dei dati siano dotati di elevata professionalità e specifiche competenze tecnico-scientifiche. D'altro canto, la necessità di rispettare procedure standardizzate, redatte nel tempo da organismi tecnici diversi, non sempre coordinate tra loro, rende la pratica corrente spesso disomogenea.

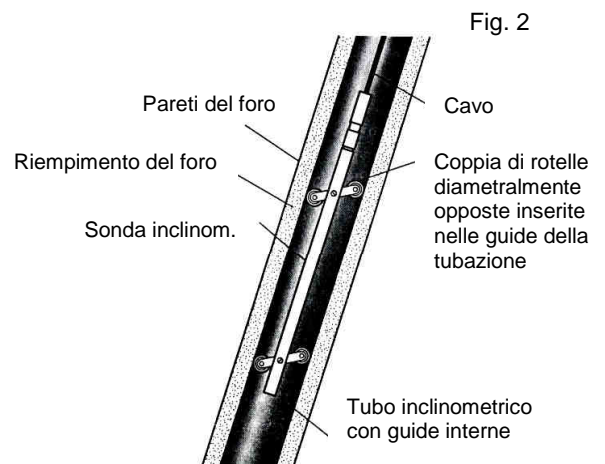
La Direttiva Tecnica ha quindi lo scopo di raccogliere ed omogeneizzare le diverse procedure operative indicate nelle norme tecniche vigenti e le regole di "buona pratica" concernenti l'installazione della tubazione, le modalità esecutive delle misure, le specifiche tecniche, la manutenzione ed uso della strumentazione, la presentazione dei report di monitoraggio e l'analisi di una

serie di misure per individuare eventuali errori sistematici di cui tener conto nella interpretazione dei dati.
La Direttiva si articola in una prima parte che contiene indirizzi vincolanti e in una seconda parte che illustra principi e regole applicative ove sono riportate le convenzioni di orientazione del sistema inclinometrico le indicazioni sulla manutenzione del sistema e le procedure per il riconoscimento degli errori.

Di seguito vengono sinteticamente illustrate le caratteristiche della strumentazione, le sue applicazioni, le informazioni che possono essere ricavate nonché un glossario dei più comuni termini tecnici utilizzati.

2. Generalità sulla strumentazione inclinometrica

La colonna inclinometrica è costituita da tubi deformabili, resi solidali al terreno, all'interno dei quali viene calata una apposita sonda inclinometrica in grado di misurarne le variazioni di inclinazione rispetto alla verticale (Fig. 2) ovvero gli spostamenti laterali (nel caso di inclinometri verticali). L'installazione della colonna di tubi inclinometrici avviene in fori di sondaggio realizzati nel terreno mediante apposite perforazioni. **Al riguardo nel presente documento vengono trattate esclusivamente le installazioni di tipo verticale**.
La sonda inclinometrica è utilizzata oltre che per il controllo delle deformazioni del tubo, anche per determinare i parametri iniziali dello stesso, intendendo la deviazione dalla verticalità e l'eventuale curvatura.

Le letture possono essere riferite alla testa della tubazione inclinometrica (la cui posizione è determinata con misure ottiche e/o GPS) oppure al fondo (considerato ancorato o comunque solidale al substrato stabile): in questo ultimo caso per ottenere valori attendibili è necessario che la base del tubo inclinometrico sia immorsata in terreno stabile e per almeno 5 metri.

Fig. 2

Gli spostamenti nel terreno sono determinati attraverso la comparazione delle misure di esercizio, ripetute nel tempo, rispetto alla posizione iniziale (misura di zero).

2.1 Descrizione della strumentazione removibile

Il sistema inclinometrico (figg. 4, 6) include:

- il *tubo inclinometrico*, installato in un foro di sondaggio, che attraversa livelli di sospetto movimento nel sottosuolo. E' dotato di quattro guide, disposte in corrispondenza dei 4 quadranti (N, S, E, W), che consentono, oltre alla corretta orientazione del tubo stesso rispetto al Nord, l'esecuzione di misurazioni ripetibili nel tempo. I tubi inclinometrici possono essere di materiali diversi ed avere diametri variabili. La scelta del materiale e del diametro viene effettuata in base alle caratteristiche del sito e delle disponibilità economiche;

- una *carrucola* dotata di strozzacavo (vedi fig. 3) da installare sulla testa del tubo. L'uso della carrucola è opportuno ogniqualvolta sia possibile in quanto garantisce di evitare l'eccessivo piegamento del cavo in corrispondenza del testa – tubo oltre a bloccare il cavo in fase di acquisizione di ogni singola misura;

- una *sonda inclinometrica biassiale portatile*, costituita da un corpo di acciaio inox e dotata di appositi sensori servoaccelerometrici, ovvero sensori MEMS [1], per la misura dell'inclinazione. I servoaccelerometri sono disposti sui due piani ortogonali tra loro dei quali uno parallelo alle scanalature di guida del tubo inclinometrico e l'altro perpendicolare ad esse, e sono solidali a due carrelli provvisti di rotelle, posizionati ad una distanza di 50 cm uno dall'altro. Questi carrelli sono progettati per far scorrere la sonda lungo le quattro guide di cui è dotato il tubo inclinometrico, e permettono alla sonda stessa di acquisire le inclinazioni rispetto alla verticale (figg. 2, 10). Il piano in cui giacciono le ruote definisce l'asse "A" della sonda, mentre quello ortogonale definisce l'asse "B";

Fig. 3

- una *centralina portatile digitale di misura* (Datalogger) per la lettura e l'acquisizione dei dati;

- un *cavo elettrico di collegamento* tra la sonda inclinometrica e la centralina di misura, con relativo rullo avvolgicavo. Il cavo ha anima di acciaio per minimizzare i fenomeni di allungamento ed è rivestito di neoprene per garantire la massima flessibilità anche alle basse temperature. Il cavo è graduato con tacche di riferimento ogni 0,50 cm al fine di garantire la precisione del posizionamento della sonda. Le tacche di riferimento sono calibrate sul punto medio della sonda;

- una *sonda definita "testimone"* per il controllo della accessibilità dei tubi inclinometrici prima dell'inizio di una serie di misure. Tale sonda è costituita da un semplice carrello non strumentato, di basso costo, avente la stessa meccanica esterna della sonda inclinometrica. La sonda testimone viene fornita munita di un cavetto in acciaio centimetrato con relativo rullo avvolgicavo;

Fig. 4

- una *sonda spiralometrica* che consente di misurare l'angolo di torsione delle guide dei tubi inclinometrici. Tale torsione può essere ingenerata sia dal processo di costruzione dei tubi sia dal non perfetto allineamento dei

vari spezzoni, nonché dalle operazioni di recupero dei rivestimenti provvisori del foro di sondaggio utilizzati durante la perforazione. La lettura spiralometrica viene effettuata una sola volta per ogni installazione, solitamente contestualmente alla lettura di zero, ed è necessaria solo per tubi profondi, indicativamente oltre i 30/40 m.

- un *apposito software per l'archiviazione* e gestione dei dati e per la restituzione grafica dei risultati delle elaborazioni. Gli applicativi in commercio consentono di determinare e rappresentare i movimenti orizzontali dei tubi sia in valore che in direzione. Sovente i software di gestione dei dati inclinometrici forniscono anche utilità di analisi dell'affidabilità delle letture e di correzione di eventuali errori.

2.2 Applicazioni e limiti della strumentazione inclinometrica

Nella pratica corrente i tubi inclinometrici vengono utilizzati per il controllo di frane, grandi rilevati, fronti di scavo e per la verifica dell'efficienza di interventi di consolidamento realizzati o da realizzarsi (es. opere provvisionali).

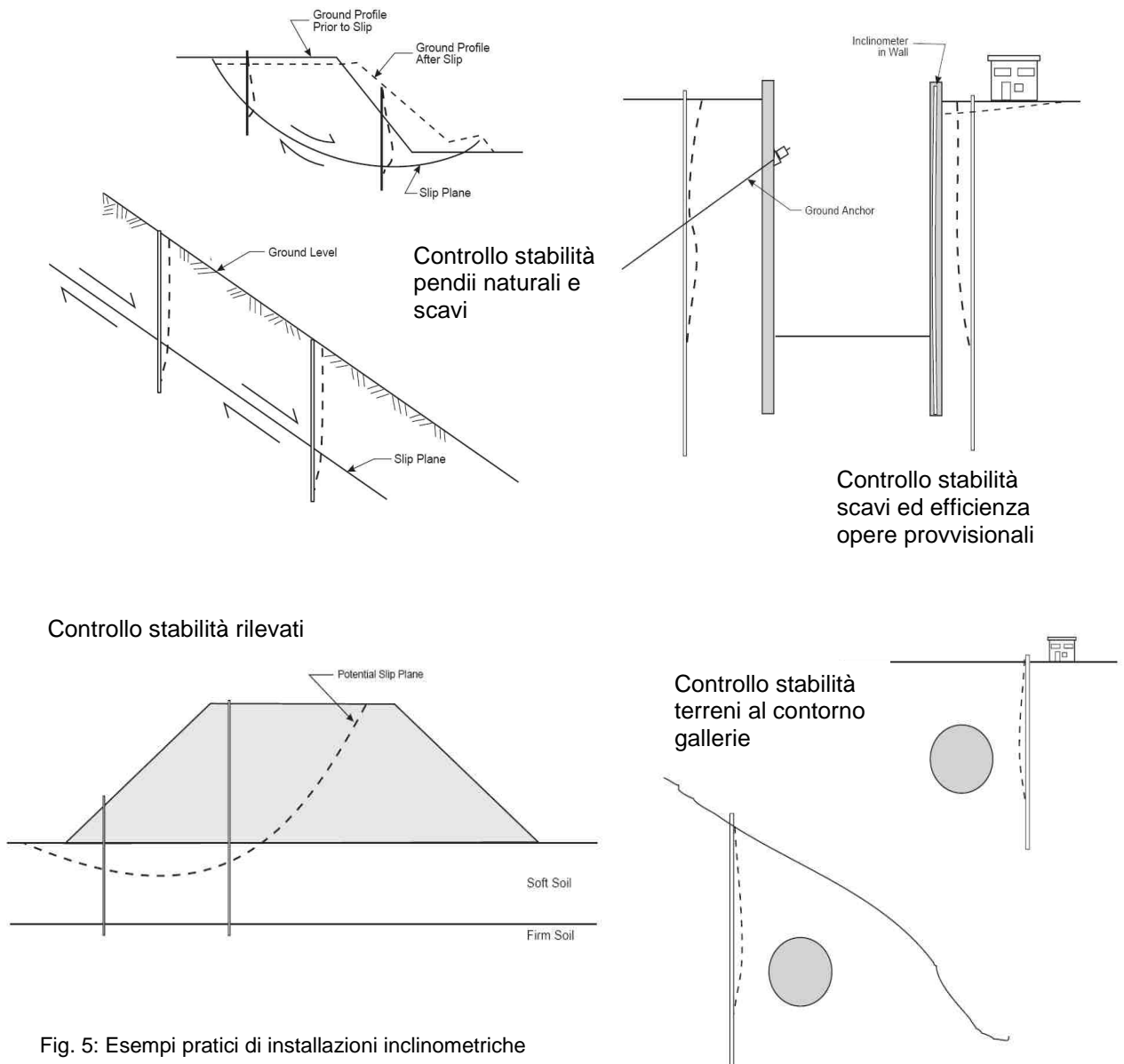
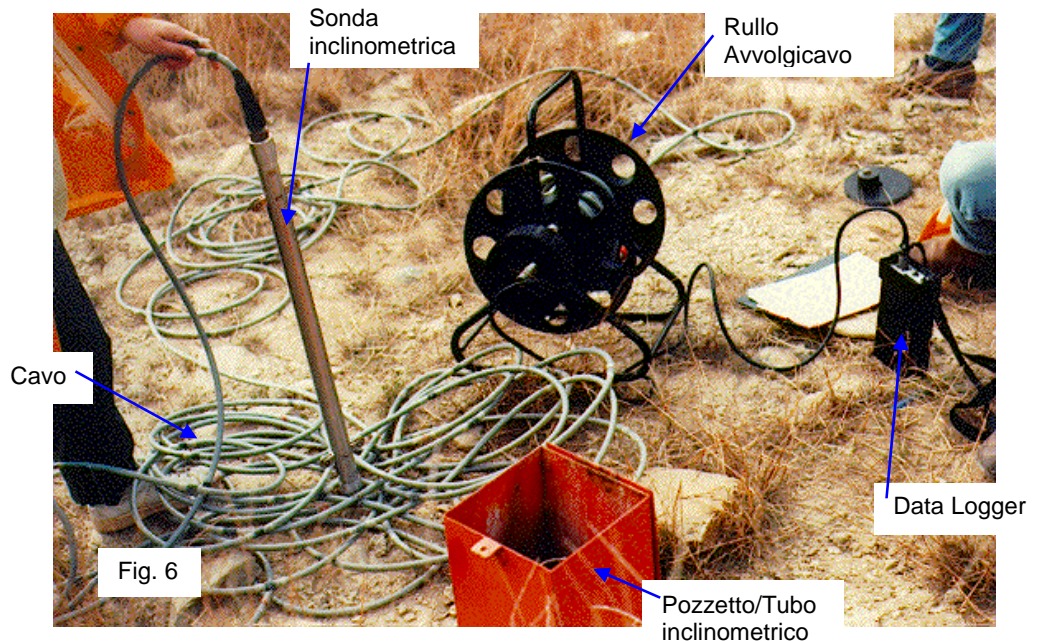



Fig. 5: Esempi pratici di installazioni inclinometriche

Nel campo del monitoraggio geotecnico dei versanti, i tubi inclinometri, controllando gli spostamenti orizzontali, forniscono una misura diretta della stabilità del sito che può essere, così, verificata attraverso campagne periodiche di monitoraggio o mediante sistemi di monitoraggio "in continuo". In quest'ultimo caso vengono installate entro la tubazione inclinometrica un certo numero di sonde inclinometriche fisse (simili a quelle removibili), collocate a profondità alle quali ci si aspetta che avvenga il movimento, solitamente determinate a seguito di misure sonde rimovibili. Le sonde fisse sono connesse ad una unità remota di acquisizione e nel caso venga eseguito un monitoraggio per scopi di protezione civile la strumentazione viene accoppiata a sistemi di allertamento.

La principale problematica connessa all'impiego dei tubi inclinometrici è l'impossibilità di eseguire le misure a seguito di movimenti consistenti del terreno (sia orizzontali che verticali) che possono danneggiare i tubi (deformazioni di taglio, schiacciamenti, deformazioni delle sezioni, ecc.) compromettendo la possibilità di eseguire le misure con le sonde. Nello specifico risulta che per tubi aventi diametro di 76 mm il limite massimo di spostamento misurabile è pari a 5/6 cm, se prodotto da un taglio netto, e 10/12 cm, se causato da una deformazione progressiva. Tali valori sono da considerarsi indicativo poiché numerose sono le variabili che incidono oltre all'entità dello spostamento.

La frequenza delle misure è, inoltre, condizionata dall'accessibilità dei tubi, soprattutto nella stagione invernale, e dai tempi di misura (una verticale da 30 m se rilevata sulle 4 guide richiede almeno 2 ore di lavoro, in condizioni ottimali, escludendo i tempi di spostamento e posizionamento).

Fig. 6

2.3 *Dati e informazioni derivanti dal rilievo inclinometrico*

I tubi inclinometrici forniscono informazioni relativamente a:

- **profondità della superficie di spostamento**: è necessaria nella definizione del modello geologico della frana;
- **spessore della zona di taglio/deformazione:** utile per la progettazione di opere di consolidamento che devono attraversare la zona di

scorrimento, per la selezione di campioni da inviare ai laboratori geotecnici, o per il posizionamento di una sonda inclinometrica fissa;

- **valore/entità di spostamento:** misurato nella zona di taglio;
- **tasso di spostamento**: necessario per valutare il coefficiente di sicurezza "attuale" nelle verifiche di stabilità condotte in *back analysis*, per misurare la variazione di spostamento a seguito di eventi meteorici o di altre cause innescanti, per confermare la stasi del fenomeno a seguito, ad esempio, della realizzazione di interventi di consolidamento;
- **direzione di spostamento**, da considerare che in grossi corpi di frana può anche variare a causa di movimenti differenziali per l'innesco di corpi franosi secondari aventi tipologie e cinematiche anche diversi da quello principale.

L'accuratezza delle misure inclinometriche dipende sia dalla qualità della strumentazione sia dalla cura prestata in fase di esecuzione delle misure. Ad esse, infatti, sono associabili due distinte categorie di errori: sistematici ed accidentali (*random*).

In particolare sono causa di errori sistematici:

- la variazione della sensibilità delle apparecchiature di misura (derive di temperatura e invecchiamento dei sensori);
- la variazione dell'assetto dei sensori inclinometrici, dovuta alla costruzione meccanica dello strumento;
- la variazione dei valori di "zero", ovvero di taratura, dei sensori stessi;
- gli errori dovuti alla spiralatura delle tubazioni ovvero di torsione delle guide dei tubi inclinometrici. Tale spiralatura è dovuta sia al processo di costruzione dei tubi, sia al non perfetto allineamento dei vari spezzoni di tubo, nonché alle operazioni di recupero dei rivestimenti provvisori del foro di sondaggio usati durante la perforazione.

Sono causa di errori accidentali:

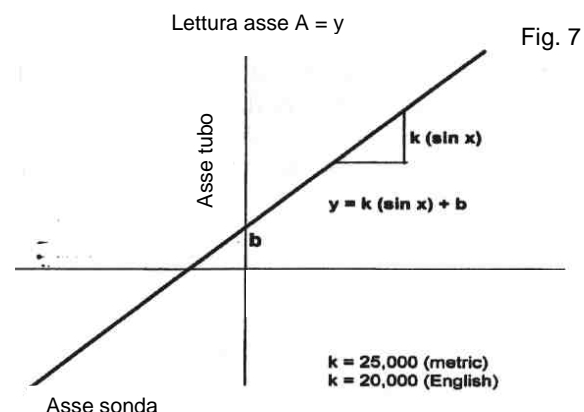
- la variazione dell'assetto della sonda dovuto a variazioni di tolleranza meccanica tra ruote e guide, a causa di deposizioni, incrostazioni, giunti, ecc.;
- la scarsa precisione nella determinazione della quota della sonda.

2.4 Significato delle misure inclinometriche

Come già detto il tubo inclinometrico dispone di quattro guide lungo le quali scorre la sonda e, durante la misurazione, il piano in cui giacciono le ruote definisce l'asse "A" della sonda, mentre quello ortogonale definisce l'asse "B".

L'inclinazione della sonda definisce un segnale sugli assi A e B; a seconda delle convenzioni adottate dal sistema di riferimento, il valore misurato può essere negativo o positivo (vedi Parte II).

Fig. 7

I numeri visualizzati sul display digitale dell'unita di lettura della sonda corrispondono a valori di inclinazione del tubo rispetto alla verticale, proiettati sui piani A e B e moltiplicati per una costante strumentale K (vedi §. B.4 e Parte II), a meno dello

“**sbilanciamento dello zero**[2]” (***b***), chiamato anche *bias o “zero offset”*, che assume valori diversi per i due assi.

La figura fig. 7 schematizza il “significato” della lettura sul piano y (canale A) di seguito definita:

Lettura $_{(asse\ A,\ B)}$ **= k (sin θ) + b** [digit]

L’unità di lettura convenzionali della misura inclinometrica e il “digit”; la conversione metrica da unità di lettura (*digit)* a millimetri è pari a 0,01 mm/digit.

La **lettura** “**coniugata**” è una procedura mediante al quale si svolgono due letture, alla stessa quota, sulle guide opposte: la sonda risulta, così, “orientata“ verso la direzione “A1” [3] per la prima lettura ed alla direzione “A3” (posta a 180° rispetto ad A1) per la seconda lettur a (vedi fig. 8). La misura corrispondente all’inclinazione del tubo sul piano A è detta **lettura “combinata”** (T_n) e corrisponde alla media (in segno) delle due letture coniugate (vedi esempio seguente).

Lettura A1 = 359 Lettura A3 = -339

Lettura combinata (T_n) =

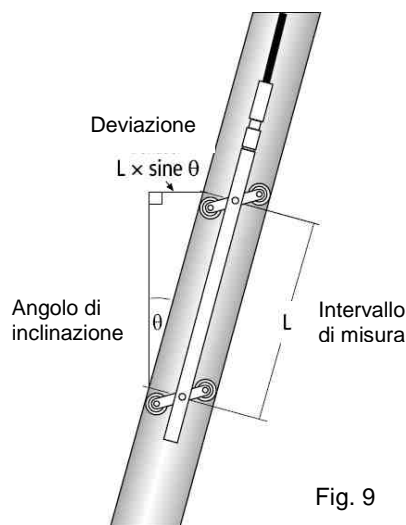
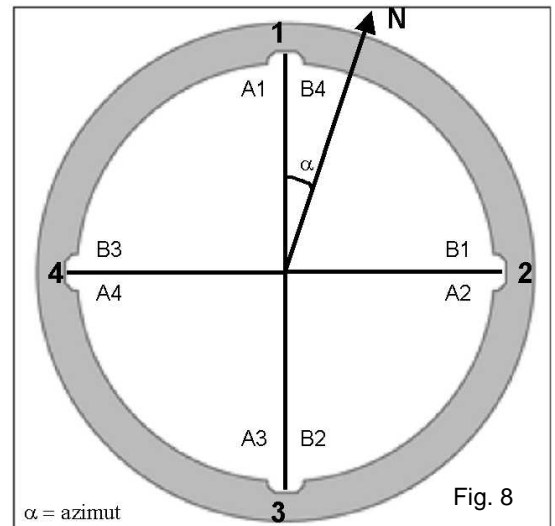
$$\frac{359-(-339)}{2} = 349$$

Fig. 8

Il passaggio da valori angolari a spostamenti avviene mediante una funzione trigonometrica di seguito rappresentata :

$$\text{sen}\,\theta = \frac{cateto\ opposto}{ipotenusa} \qquad \text{ovvero}$$

cateto opposto = ipotenusa x sen θ

Fig. 9

La funzione seno, ovvero la misura angolare, viene derivata dal valore prodotto dai sensori servoaccelerometrici installati nella sonda inclinometrica, che sono calibrati, di norma, per misure comprese tra +/- 15° dalla verticale.

L’angolo θ è l’angolo di inclinazione dalla verticale, l’ipotenusa è il passo della sonda, ovvero l’intervallo di misura, o passo delle letture (generalmente pari a 0,5 metri), mentre il lato opposto rappresenta la “*deviazione*” laterale.

Gli spostamenti laterali del tubo vengono calcolati ad ogni profondità: per convenzione questo valore è chiamato "**deviazione incrementale**” (*lateral deviation, deviation*), vedi fig. 9, ed è definito mediante la seguente formula:

Deviazione incrementale = (Misura relativa sul piano A/B x sinθ) =

$$= \text{passo letture} \times \frac{\text{differenza algebrica delle due letture coniugate}}{2 \times \text{K}} =$$

$$= 0{,}5\ metri \times \frac{359-(-339)}{2 \times 25.000} = 6.98 \text{ mm}$$

La somma di successive deviazioni incrementali, in funzione della profondità, è detta "**deviazione cumulativa**" (d_n) (vedi figura 10) che rappresenta, anche, lo scostamento del tubo dalla perfetta verticalità..

La variazione delle deviazioni cumulative definiscono lo "**spostamento**" (*displacement*) del tubo inclinometrico.

Per calcolare lo ***spostamento*** è necessario disporre di due serie di letture "combinate" successive (T_0 e T_1) in quanto viene calcolato sottraendo la lettura "combinata" iniziale (T_0) alla lettura seguente (T_1), dividendo per 2, e moltiplicando per la costante strumentale (K) e moltiplicare per il passo di lettura.

Lettura combinata corrente (T_1) = 700 Lettura combinata iniziale (T_0) = 698

Spostamento = variazione letture x sinθ $= 0{,}5\ metri \times \frac{700-698}{2 \times 25.000} = 0.02$ mm

Deviazione Cumulativa

$d_1 + d_2 + d_3$

$d_1 + d_2$

d_1

$d_1 = L \times \sin\theta_1$
$d_2 = L \times \sin\theta_2$
$d_3 = L \times \sin\theta_3$
$d_n = L \times \sin\theta_n$

Fig. 10

Lo **spostamento incrementale** rappresenta il cambiamento rispetto a ciascun intervallo di misura. Lo **spostamento cumulativo** (fig. 11) è la somma degli spostamenti incrementali.

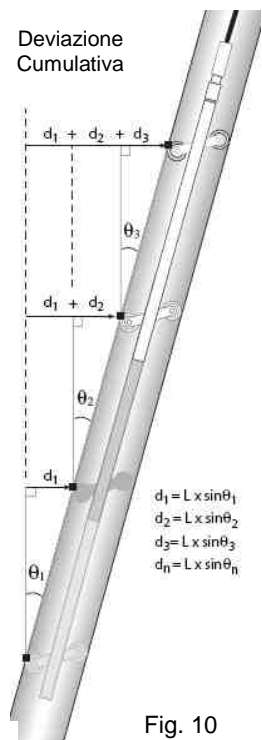
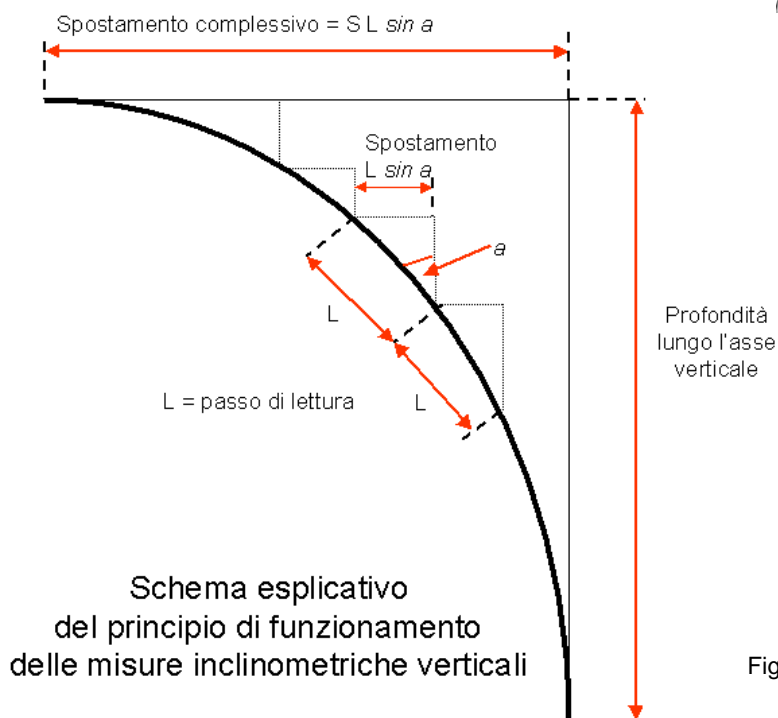



Fig. 11

3. Normative e raccomandazioni di riferimento

- ISRM (1977) - Suggested Methods for Monitoring Rock Movements using inclinometers Tiltmeters.
- ASTM D 4622 - 86 (1993) - Standard Test Method for Rock Mass Monitoring Using Inclinometers.
- ASTM D 6230 - 98 (2005) – Monitoring Ground Movement Using Probe-Type Inclinometers.
- ANISIG (2002) - Modalità tecnologiche per l'esecuzione di indagini geognistiche e l'installazione e la gestione di impianti di monitoraggio.

4. Glossario e bibliografia

Glossario

Affidabilità
Fornisce una definizione di tipo pratico prescindendo da valutazioni di tipo statistico. Si definisce affidabilità la capacità di uno strumento di operare correttamente e quindi di fornire i risultati attesi per il periodo di tempo richiesto e nelle condizioni operative previste.

Ampiezza del segnale in uscita (*Span - Output*)
La differenza algebrica tra il valore massimo ed il valore minimo del segnale generato da uno strumento al variare della grandezza misurata tra il valore massimo ed il valore minimo, a parità di condizioni ambientali.
Esempio: uno strumento che ha un valore minimo del segnale paria 3.995 mA ed un valore massimo pari a 19.998 mA, ha un'ampiezza del segnale in uscita pari a 16.003 mA.

Campo di misura (*Range*)
Il campo delimitato dai limiti inferiore e superiore, all'interno del quale uno strumento misura in accordo alle specifiche. Limite inferiore del campo di misura: è il minimo valore della grandezza misurata che uno strumento è in grado di misurare correttamente. Limite superiore del campo di misura: è il massimo valore della grandezza misurata che uno strumento è in grado di misurare correttamente. Viene spesso definito - in modo non propriamante corretto - come fondo scala [f.s.], che è la differenza tra il limite superiore ed il limite inferiore.
Esempio: uno strumento che ha limite inferiore pari a -5 kPa e limite superiore pari a 80 kPa ha un campo di misura, o fondo scala, pari a 85 kPa.

Condizioni operative (*Operating conditions*)
Le condizioni in cui uno strumento si trova ad operare, esclusa la grandezza da misurare. Si considerano condizioni ambientali: la pressione dell'ambiente (atmosferica o artificiale), la temperatura ambiente, i campi elettromagnetici, il campo gravitazionale, l'inclinazione di un piano di appoggio, la variazione della tensione di alimentazione, le radiazioni, gli shock e le vibrazioni. Le variazioni di queste condizioni - sia statiche che dinamiche - devono essere considerate nella scelta di uno strumento.

Controllo (*Control*)
Insieme dell'attività di monitoraggio e delle azioni successive, finalizzate all'interpretazione dei dati sperimentali, alle previsioni sulle evoluzioni possibili e prevedibili, all'indicazione degli interventi conseguenti.

Deriva (*Drift*)
Variazione non attesa del segnale in uscita, non correlata alla variazione della grandezza misurata. Tipiche sono le derive nel tempo, dovute a modificazioni fisiche dei componenti lo strumento, e quella termica che implica una variazione del segnale dello strumento, a parità della grandezza misurata, in funzione della variazione della temperatura dello strumento. Viene normalmente espressa come +/- una percentuale del segnale corrispondente al fondo scala.
Esempio: uno strumento che ha un segnale di fondo scala pari a 16 mA, e sta misurando - alla temperatura di 20 °C - una grandezza cui corrisponde un segnale pari a 10.2 mA, ed ha una deriva termica di 0.01% f.s./°C. Alla temperatura di 35 °C fornirà un valore pari a 10.224 mA, pur non essendosi modificato il valore della grandezza misurata.

Isteresi (*Ysteresis*)
La proprietà di uno strumento che si evidenzia con la dipendenza del valore generato, per una determinata variazione della grandezza misurata, dalla storia delle precedenti variazioni e dalla direzione della attuale misura (crescente o decrescente. E' definita come la massima ampiezza dell'intervallo tra le misure in salita ed in discesa per un ciclo completo di misura della grandezza variabile, esclusi fenomeni di transitorio. Viene normalmente espressa come valore assoluto percentuale del campo di misura (o del fondo scala).
Esempio: uno strumento che ha un range di 30° ed un'ampiezza massima tra salita e discesa, per uno stesso valore della grandezza misurata, di 0.005° ha un'isteresi pari a 0.005° o dello 0.016% f.s.

Linearità (*Linearity*)
La massima deviazione della curva di calibrazione (media delle misure in salita ed in discesa) dalla retta di interpolazione che rende minima la deviazione stessa. Molti degli strumenti utilizzati hanno, teoricamente, un'uscita lineare. La non-linearità esprime la l'entità dalla differenza tra il comportamento teorico e quello

reale, ed è parte dell'errore globale dello strumento. Viene normalmente espressa come +/- una percentuale del campo di misura (o del fondo scala).
Esempio: uno strumento che ha un range di 120 °C ed una linearità di +/- 0.10% f.s, è uno strumento che, utilizzato nelle condizioni previste, fornisce misure che si discostano dal valore teorico lineare di +/- 0.12 °C (larghezza della banda di errore: 0.24 °C).

Monitoraggio (*Monitoring*)
Insieme di attività finalizzate all'acquisizione di dati sperimentali utili alla comprensione dell'evoluzione di fenomeni fisici naturali e/o antropici o del comportamento di un'opera.

Norma, Codice, Standard
Riferimento di validità riconosciuta per l'esecuzione di un'attività specifica, con valore anche legale.

Accuratezza (*Accuracy*)
Un valore o una quantità che definisce il limite che l'errore di misura non supererà mai quando lo strumento viene utilizzato nelle condizioni di riferimento. In altri termini è il massimo errore che ci si può aspettare utilizzando un determinato strumento all'interno delle condizioni di funzionamento specificate. Include le principali componenti di errore quali la non linearità, le non ripetibilità e l'isteresi. Viene normalmente espresso in termini di +/- una percentuale del campo di misura (o del fondo scala).
Esempio: uno strumento che ha un range di 50 kN (limite inferiore 5, superiore 85) ed una precisione pari a +/- 0.25% f.s., è uno strumento che, utilizzato nelle condizioni operative di riferimento, fornisce misure che possono essere affette da un errore che sarà sempre minore od uguale a 0.25 kN (da -0.125 a +0.125).

Ripetibilità (*Repeatability*)
La differenza tra una serie di misure ripetute della stessa grandezza, nelle stesse condizioni operative e per lo stesso verso di applicazione (in salita /in discesa). Viene normalmente espressa come non ripetibilità ed è definita in termini di % del fondo scala. Non include gli effetti di isteresi.
Esempio: uno strumento che ha un fondo scala pari a 5 V ed una ripetibilità pari a 0.3% f.s., è uno strumento che, se utilizzato nelle condizioni operative previste, fornisce, per una serie di misure ripetute della stessa grandezza misurata, valori che differiscono tra loro per un massimo di 0.15 V.

Risoluzione (*Resolution*)
Il minimo intervallo tra due successivi valori che lo strumento è in grado di discernere. Questo parametro non è di rilevante importanza, ma viene spesso indicato nelle schede tecniche. Viene normalmente espresso in termini di +/- una percentuale del campo di misura (o del fondo scala). E' da tenere presente che in molti casi la risoluzione non è da riferirsi tanto allo strumento quanto al sistema di misura.
Esempio: Uno strumento che ha un range di 350 kPa ed una risoluzione pari a 0.1% f.s., è uno strumento che, utilizzato nelle condizioni operative di riferimento, è in grado di discernere (risolvere) una variazione nella grandezza misurata pari a 0.35 kPa.

Segnale in uscita (Output signal)
Il tipo di segnale fornito da uno strumento. Tipici segnali in uscita sono: mV, mV/V, V, mA, Hz.

Sensibilità (Sensitivity)
Il rapporto tra la variazione del segnale di uscita dello strumento e la variazione della grandezza misurata.
Esempio: uno strumento che ha un range di 350 kPa ed un segnale a fondo scala di 2000 Hz, ha una sensibilità pari a 2000/350=5.714 [Hz/kPa].

Sensore (Sensor)
Elemento contenuto nello strumento e sensibile alle variazioni della grandezza da misurare. Può essere basato su vari principi di misura che caratterizzano lo strumento. Da solo non è idoneo alle applicazioni pratiche; necessita della meccanica di adattamento e protezione e dell'eventuale elettronica.

Stabilità a lungo termine (Long Term Stability)
La capacità di uno strumento di operare senza subire alcuna modifica che comporti variazioni di segnale, non correlate a variazioni della grandezza misurata per un determinato periodo di tempo.

Strumento (Instrument)
Dispositivo atto alle misura di una determinata grandezza fisica e composto da vari elementi tra i quali il sensore (cuore dello strumento), la meccanica (per il montaggio e l'adattamento dello strumento alle condizioni operative e, per gli strumenti "elettrici", l'elettronica (dispositivo atto ad alimentare il sensore e a fornire un seganle in uscita di caratteristiche note e controllate).

Validazione
Operazione che permette di definire se una misura è da considerarsi attendibile in termini strumentali.

BIbliografia

Bruzzi, D., Pezzetti, G. e Piccoli, S. (1986) - "La strumentazione geotecnica nel monitoraggio dei movimenti franosi profondi", XVI CNG, Bologna, pagg. 153-164.

Bruzzi, D., (1994) - "Sistemi di monitoraggio", *Atti del II corso di aggiornamento professionale, Ordine dei Geologi della Toscana*, pagg. 1-7.

Bringiotti M, Bottero D. (1999) - "Consolidamenti e fondazioni" Ed. PEI, 574 pagg.

Collotta T., Ghini D., Lazzari, A., Neri, A. e Moretti, P.C. (1987) - "Il controllo della stabilità dei pendii mediante installazione di tubi inclinometrici", Autostrade, anno XXIX, n°11/12.

Cornforth Derek H., (2005) – “Landslides in Practice”, Wiley, pagg. 70-82

Devin P., Frassoni, A. e Rossi, P.P. (1988) - “La strumentazione per il controllo e l’osservazione dei movimenti di versante”, Secondo ciclo di conferenze di meccanica e ingegneria delle rocce, Politecnico di Torino, pagg. 5.1-5.21

Di Biagio E., Pezzetti, G. e Bruzzi, D. (1999) - “Classification, certification and specification of instruments for field measurements”, Proceedings of FMGM, Singapore.

Dunnicliff, J. (1993) - “Geotechnical instrumentation for monitoring field performance”, Wiley & Sons, 577 pagg.

Dunnicliff, J. (1995) - “Keynote paper - Monitoring and instrumentation of landslides”, Proc. 6th ISL, pagg. 1881-1895.

Durville, J.L., Gouin, T. e Pouget, P. (1994) - “Surveillance des pentes instables. Guide technique”, Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, 125 pagg.

Grecchi M., Muggiati G. (2006) – “Elementi di Monitoraggio geotecnico e strutturale“ Ed. Geomon Milano 500 pagg.

ISA - Instrument Society of America - (1938) - “Standard and Practice for Instrumentation” Std. ISA-S51.1 Process Instrumentation Terminology, 7th Edition, 1983 and seq.

Mannucci G., Notarpietro A., (2005) - “Linee Guida per il controllo dei fenomeni franosi”, Vol.1, IREALP, 124 pagg.

Mannucci G., Notarpietro A., (2007) - “Linee Guida per il controllo dei fenomeni franosi”, Vol.2, IREALP, 79 pagg.

Mikkelsen P.E., (2003) “Advances in Inclinometer Data Analysis”, Symposium on Field Measurements in Geomechanics, FMGM 2003, Oslo, Norway, September

Maugeri, M., Costa, C.P. e Randazzo, F. (1981) - “Reliability of the inclinometer measurements”, Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Comptes Rendus du Congres International de Mecanique des Sols et des Travaux de Fondations, vol.10, Vol. 2, pagg. 519-522

RFI (2003) – Manuale di progettazione - Geologia

Sappa, M. e Sappa, G. (1995) - “Observations on inclinometer measurements”, FMGM95 (Proceedings of the 4th International Symposium Bergamo April 10-12, 1995), pagg. 333-340.

SISGEO (2005) – Manuale d’uso, Inclinometri

SLOPE INDICATOR (2001) – Data reduction and Error Correction

SLOPE INDICATOR (2003) – DigiPro for Windows

SLOPE INDICATOR (2004) – Guide to Geotechical Instrumentation

SLOPE INDICATOR (2006) – Digit Inclinometer Probe

SPEA (2001) - Lavori di indagine geotecnica, Norme tecniche d’appalto

Stevens, W.R. e Zehrbach, B.E. (2000) - “Inclinometer data analysis for remediated landslides”, Geotechnical measurements; lab and field. Ed. Marr, W. Allen, Geotechnical Special Publication, vol. 106, pagg. 126-137.

UNI - Normativa UNI 4546 Novembre 1984 - Misure e misurazioni – Termini e definizioni fondamentali.

NOTE *(Parte generale)*

---

[1] Recentemente sono presenti in commercio anche sonde dotate di sensori “MEMS”, acronimo di **Micro Electro-Mechanical Systems** ovvero microsistemi elettromeccanici integrati in forma altamente miniaturizzata, che coniugano le proprietà elettriche con proprietà opto-meccaniche. Nella Direttiva vengono trattati unicamente i sensori servoaccelerometrici che risultano maggiormente diffusi e tesati.

[2] Con il termine “sbilanciamento dello zero” si intende il valore, positivo negativo, del segnale rilevato dalla sonda anche in condizioni di perfetta verticalità il quale teoricamente dovrebbe essere zero: tale valore di fatto rappresenta lo “zero” del sistema Sonda - Centralina di lettura.

[3] La guida A1 viene anche indicata come A0. Nel presente documento si utilizza esclusivamente la dizione A1. La guida coniugata è definita A3 che viene anche indicata come A180.

PARTE PRIMA

PARTE PRIMA

A. RACCOMANDAZIONI RELATIVE ALLE SPECIFICHE TECNICHE DELLA STRUMENTAZIONE

A.1 Tubi e manicotti

I tubi inclinometrici sono tubi specifici dotati di 4 guide che individuano i 4 quadranti di 90° e che consentono l'inserimento ed il passaggio delle sonde inclinometriche. *Si raccomanda che, le guide di misura dei tubi inclinometrici abbiano scanalature profonde almeno 2 mm per consentire uno stabile posizionamento della sonda nel tubo ed evitare, così, scarrucolamenti*.

La tipologia di tipo di tubo da installare (in commercio esistono tubi di diversi diametri e di differenti materiali costruttivi) dipende dagli aspetti ambientali (temperatura, caratteristiche chimiche del terreno, ecc.) e delle finalità del monitoraggio (durata temporale, precisione richiesta, ecc.).

La scelta del diametro esterno del tubo (in commercio variano fra 48-50 mm e 85-87 mm) dipende essenzialmente dalle finalità del monitoraggio e dalla durata prevista: per il monitoraggio di frane dove ci si attendono rilevanti deformazioni sarà opportuno optare per tubi di grande diametro mentre per il monitoraggio di rilevati in terra, strutture in cemento armato o versanti in roccia, dove ci si attendono deformazioni limitate, risultano utilizzabili tubi più piccoli.

Le caratteristiche chimiche del sito di installazione e il grado di precisione richiesto dalle misure devono guidare la scelta del materiale più opportuno (in commercio i materiali più utilizzati sono alluminio, ABS, in minor misura il PVC e la vetroresina).

L'alluminio rappresenta lo standard comunemente utilizzato, ne è però sconsigliato l'uso in presenza di ambienti chimicamente aggressivi (es. ambienti alcalini, formazioni gessose, presenza di correnti vaganti, ecc.); i tubi in alluminio richiedono, inoltre, una cementazione eseguita con cemento pozzolanico.

In ambiente aggressivo è preferibile utilizzare tubi in ABS di spessore minimo non inferiore a 4 mm: l'utilizzo di questo materiale è attualmente largamente impiegato per le sue caratteristiche di flessibilità, per la facilità di montaggio e per la precisione di assemblaggio degli spezzoni.

I tubi in plastica PVC invece soffrono le basse temperature e tendono a rompersi indipendentemente dalle deformazioni dell'ammasso. Quelli in vetroresina, in caso di forti deformazioni tendono a "sfibrarsi" ostacolando, così, il passaggio della sonda di misura.

Per quanto sopra si raccomanda di evitare l'utilizzo di tubi in PVC e in vetroresina.

Un'installazione inclinometrica prevede le I tubi inclinometrici sono formati da assemblaggio, giunzione e sigillatura di spezzoni di tubi di lunghezza standard di 3 m: poiché la corretta installazione degli spezzoni è fondamentale al fine di non incorrere in imprecisioni che possono inficiare i risultati del monitoraggio, l'utilizzo

di spezzoni di tubo con lunghezza inferiore ai 3 metri deve essere sempre evitato, al fine di limitare il numero di giunti nell'installazione.

Al fine di garantire l'omogeneità delle misurazioni eseguite lo standard comunemente utilizzato, e richiesto dalla presente Direttiva, per una perforazione corrente avente diametro 101 mm è rappresentato nella tabella 1:

		TAB. 1
spezzoni	lunghezza non inferiore a 3 m	
ø interno tubo	76 mm	
ø interno guide	82 mm	
ø esterno guide	86 mm	
Materiale:	alluminio (UNI 3569/66)	plastica ABS
Massa	non inferiore a 1350 g/m	non inferiore a 600 g/m
Spessore	min. 2 mm	min. 3 mm
Eventuali protezione	anodizzazione o verniciatura con vernici epossidiche	
Angolo di spiralatura dei tubi	< 0,5°/m	
Assoluta perpendicolarità delle sezioni terminali degli spezzoni di tubo rispetto all'asse del tubo, con la tolleranza di +/-1°		

La giunzione tra gli spezzoni di tubo avviene per mezzo di appositi manicotti fissati agli spezzoni di tubo con adesivi specifici, diversi a seconda del materiale costruttivo del tubo - silicone e nastro adesivo isolante, meglio se autovulcanizzante, ovvero resine epossidiche -, rinforzati con rivetti. La giunzione eseguita esclusivamente tramite rivetti e mastice andrebbe evitata in quanto non garantisce la perfetta sigillatura del giunto. E' preferibile utilizzare manicotti preforati in fabbrica al fine di assicurare la corretta centratura dei rivetti ed un migliore, e più veloce, assemblaggio in cantiere.

Taluni manicotti di più moderna concezione sono dotati di "*o-ring*" di guarnizione che consentono di non utilizzare l'adesivo nei tubi in ABS.

La corretta giunzione e sigillatura degli spezzoni di tubo è fondamentale al fine di impedire infiltrazioni di malta cementizia in fase di riempimento del foro del sondaggio: eventuali infiltrazioni di cemento nel tubo inclinometrico infatti possono causare l'interruzione del tubo stesso, determinare errori nelle letture o, ancora, danneggiare la sonda.

Al fine di garantire l'omogeneità delle misurazioni eseguite lo standard di rifermento per i manicotti è riportato in tabella 2:

		TAB. 2
Materiali	alluminio	ABS
Lunghezza	300 mm	200 mm
Dimensioni	diametro interno guide = 87- 89 mm	
Gioco massimo di accoppiamento tra i tubi, dovuto al soli manicotti +/- 2°/giunto		

L'installazione di una colonna inclinometrica deve essere completata con l'apposizione di un tappo conico di fondo foro che impedisca eventuali infiltrazioni

di cemento. La testa del tubo deve essere chiusa con un tappo di testa rimovibile ed un pozzetto di protezione, eventualmente carrabile (vedi par. A5)
Nel caso di installazioni orizzontali, qualora il tubo non sia accessibile da entrambe le estremità, si dovrà prevedere l'utilizzo di una scatola di rinvio, che consenta di tirare la sonda lungo il tubo tramite un cavetto di acciaio, inserito in fase di posa.

A.2 Sonda inclinometrica

Le sonde inclinometriche sono essenzialmente costituite da un corpo cilindrico in acciaio munito di due carrelli ed un sensore servo-accelerometrico biassiale ad alte prestazioni.

Al fine di garantire l'omogeneità delle misurazioni eseguite è opportuno prevedere che le sonde utilizzate rispettino le caratteristiche standard indicate nella tabella 3:

	TAB. 3
Tipo di sonda	biassiale
Sensori	servoaccelerometrici [4]
Passo tra le ruote (intervallo di misura)	500 mm
Connettore per giunzione al cavo	stagno (500 m)
Materiale sonda-rotelle	acciaio inox
Carrelli	basculanti a due ruote
Campo di misura	almeno +/-15° dalla verticale
Sensibilità	>1/20.000 sen α (= 50 μm/m)
Assetto azimutale	non superiore a 0,5°
Risoluzione	1" di grado
Precisione totale minima (30 m tubo inclinometrico)	+/- 4 mm
Temperatura di esercizio	10°+ 50 °C
Diametro (ruote escluse)	minore o uguale 30 mm

La *sensibilità di lettura* della sonda deve essere superiore a 20.000 senα in quanto tale parametro condiziona le misure ottenute dal sistema. La variazione in temperatura della sensibilità non deve superare lo 0,015% della lettura, per grado centigrado. La sensibilità all'asse traverso non deve, invece, superare lo 0,015% del fondo scala, per grado sessagesimale

Il sensore servoaccelerometrico deve essere caratterizzato da una *variazione in temperatura dello zero* (Output Temperature Sensitivity), inferiore a 100 ppm/°C, ovvero 0,01% del fondo scala per °C. Tale parametro è importante ai fini della precisione delle misure poiché si relaziona al valore di deriva termica *"dello Zero"* che può essere compensato, insieme al valore di *b* (sbilanciamento dello zero), mediante il software di acquisizione. Spesso le condizioni di temperatura ambientale sono tali che è, comunque, necessaria la stabilizzazione "termica" dello strumento, in foro, per alcuni minuti.

Altro elemento di rilievo spesso non indicato nelle schede tecniche è *l'assetto angolare* della sonda ovvero l'angolo con cui lo strumento "legge" l'inclinazione che misura. Esso deve essere il più possibile prossimo a zero (in generale un buon sistema ha un assetto angolare compreso tra +/- 1°).

Le differenze nel tempo della sensibilità di lettura e dell'assetto angolare sono di piccola entità rispetto ai valori nominali; poiché, però, queste piccole variazioni, - per la sensibilità percentuali non superiori al 1% e per l'assetto angolare pochi decimi di grado sessadecimale - possono comunque falsare i risultati delle elaborazioni è necessario mantenere l'apparecchiatura di misura sempre perfettamente tarata.

A.3 Cavo

Il cavo elettrico di collegamento fornisce l'alimentazione alla sonda e trasmettere i segnali rilevati, nonché garantisce il sostegno e permette la determinazione della profondità di lettura. A questo scopo esso deve essere dotato di tacche di riferimento vulcanizzate ogni 0.5 m, in accordo al passo tra le ruote del sonda.

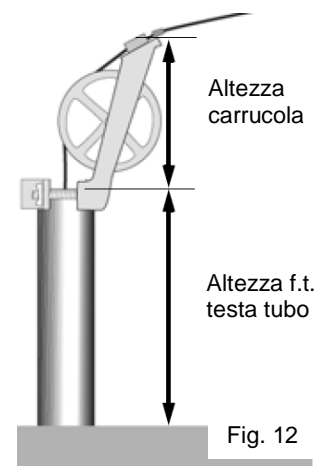
Il cavo deve essere di tipo inestensibile con armatura interna in acciaio o Kevlar e deve avere la guaina esterna antibrasione; il cavo deve essere anche provvisto alle estremità di connettori stagni per il collegamento alla sonda ed alla centralina di lettura.
La lunghezza del cavo non deve essere inferiore a 50 m. L'errore della metratura del cavo dovrà essere inferiore a 5 cm ogni 100 m e l'allungamento con carico di 20 kg inferiore allo 0,05%; il cavo dovrà, inoltre, garantire nel tempo la costanza della distanza tra le tacche di misura, da verificarsi, con bindella metrica indeformabile, ad intervalli regolari, preferibilmente non superiori a 6 mesi.

Poiché l'accuratezza delle misure inclinometriche dipende da quanto, per ciascun ciclo di letture successive, è mantenuta costante la profondità riferita ad ogni intervallo di lettura, occorre posizionare la tacca di riferimento del cavo sempre nello stesso punto di controllo, con una precisione di +/- 6 mm.
Al riguardo si osserva che l'utilizzo della carrucola strozzacavo, quando correttamente posizionata, può assicurare la precisione e ripetitività della profondità di lettura in quanto il sistema di bloccaggio trattiene il cavo durante l'acquisizione e la parte superiore del telaio della carrucola può fornire un utile punto di riferimento (fig. 12). In tale contesto poiché le misure devono essere riferite alla testa tubo occorre calibrare le stesse sulla distanza tra la parte superiore del telaio e la testa del tubo inclimetrico,
(altezza carrucola o *pulley height*, fig. 12).

Più in generale poiché le letture inclinometriche sono riferire al piano campagna i programmi di restituzione delle letture inclinometriche consentono di inserire il valore di "*depth offset*" del tubo, ovvero di altezza fuori terra del testa tubo, che sarà costante per tutte le successive letture. Nei casi di utilizzo della carrucola occorre considerare anche l'altezza della stessa (*pulley height)* nel valore dell'altezza standard di offset.

Altezza carrucola

Altezza f.t. testa tubo

Fig. 12

A.4 Data - Logger

E' uno strumento di misura di precisione contenuto in un involucro realizzato in robusto materiale con adeguato grado di protezione con il quale vengono:
a) alimentati i sensori della sonda;
b) amplificati i segnali rilevati;
c) registrati o visualizzati i valori di lettura.

Le centraline di misura di tipo automatico, sono i modelli più diffusi e:

Fig. 13

- permettono la visualizzazione delle letture sia in termini di spos (deviazione lineare) che in seno dell'angolo di inclinazione;
- mostrano simultaneamente sul video (LCD) le letture delle due inclinazioni (con sonda biassiale) e la relativa profondità;
- sono dotati di batterie al Ni-Cd dall'autonomia elevata;
- hanno una utile retroilluminazione che ne consente l'utilizzo anche in condizioni di luce non ottimali;
- possono essere dotate di efficaci riscaldatori interni che permettono letture in condizioni di temperatura alquanto rigide (anche - 10 °C);
- hanno elevate capacita di memorizzazione (sino a 30.000 letture), con registrazione dei dati rilevati su memoria magnetica e non volatile;
- visualizzano immediatamente i valori degli spostamenti, gli scarti tra le letture coniugate, con restituzione numerica completa accompagnata dai relativi grafici;
- permettono il collegamento a PC per il trasferimento dei dati registrati.

Sul display dei *Data Logger* sono visualizzate le inclinazioni espresse in seno dell'angolo, amplificate di un fattore detta costante strumentale (k) definita dal costruttore (pari a 20.000 o 25.000) e con coefficiente di deriva termica compreso tra 0,01 e 0,03% fondo scala/°C.

Al fine di garantire l'omogeneità delle misurazioni eseguite è opportuno che la centralina di misura abbia le caratteristiche standard indicate nella tabella 4:

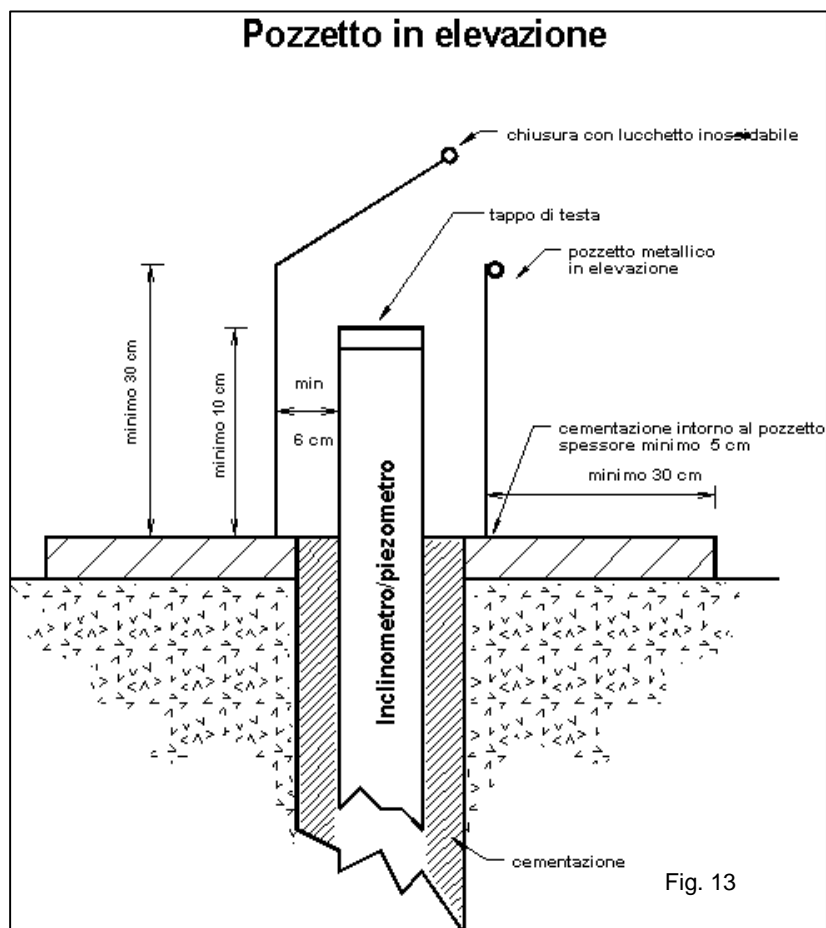
	TAB. 4
Display	4 1/2 digits LCD
Risoluzione	1/20.000; 1/25.000
Precisione tipica	+2 digits; +/- 0,3 digit/°C
Lettura	20.000/25.000 sen α
Temperatura di utilizzo	0 - 40 °C
Alimentazione	batterie interne ricaricabili
Autonomia	min. 10 ore
Protezioni	IP 64

A.5 Pozzetto in elevazione e carrabile

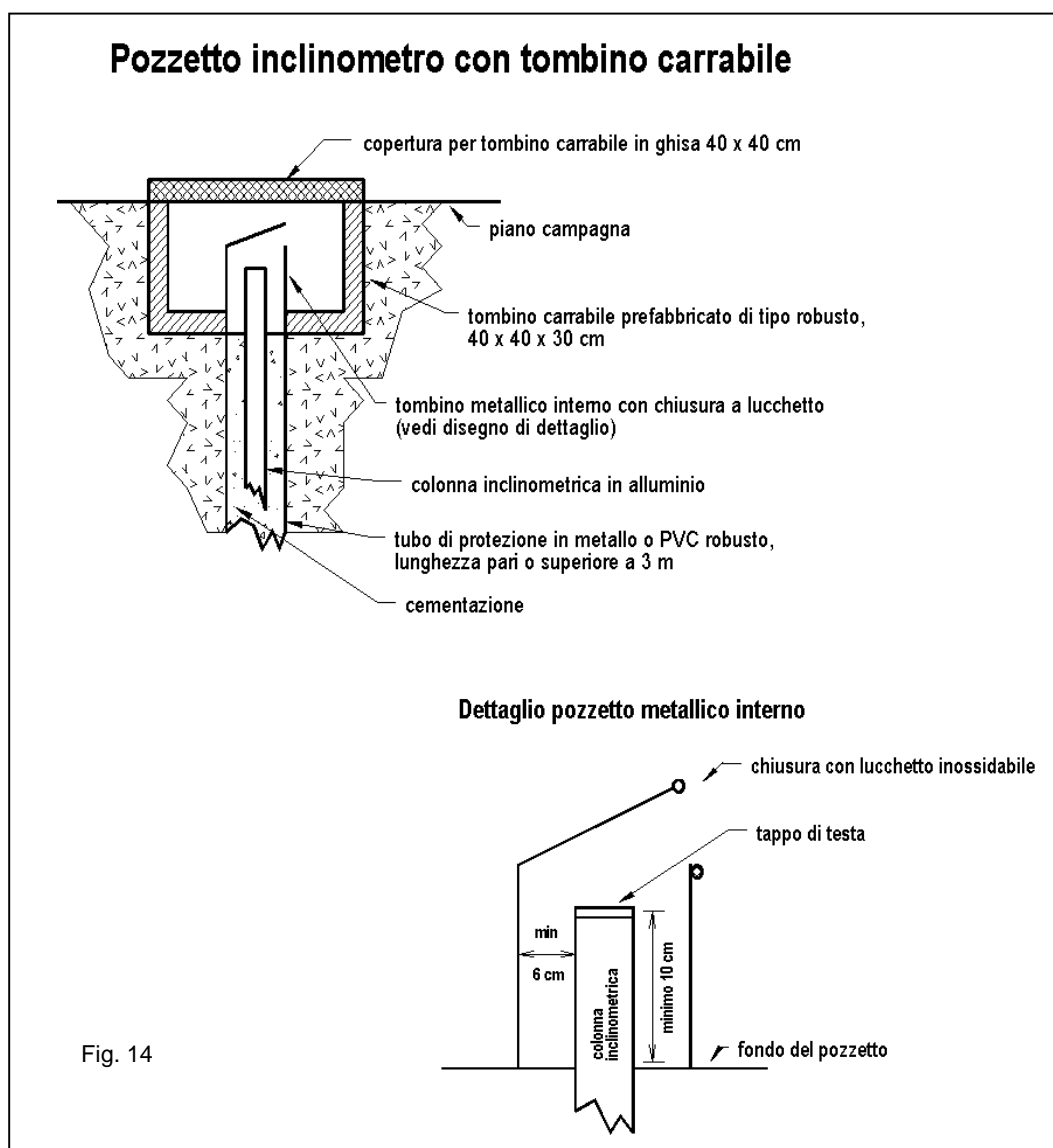
Come detto in precedenza per garantire la durata nel tempo dell'installazione inclinometrica è fondamentale realizzazione adeguati pozzetti metallici di protezione, i quali possono essere in elevazione (a sezione quadra o circolare) o di tipo carrabile (nel caso di installazione in luoghi aperti al traffico veicolare o pedonale): per ognuno di loro vengono di seguito esplicitate le caratteristiche tecniche.

Pozzetto in elevazione (fig. 13)

- costituito da un pozzetto metallico in elevazione, sporgente dal terreno per minimo 30 cm.
- il tubo inclinometrico (uno spezzone normale, non un manicotto) deve emergere all'interno del tombino metallico, libero dal cemento, per 10 centimetri minimo.
- tra le pareti esterne del tubo inclinometrico e le pareti interne del tombino metallico deve esservi uno spazio minimo di 6 cm.

Fig. 13

Tombino carrabile (fig. 14)

- costituito da un manufatto in cemento prefabbricato di tipo robusto, avente dimensioni 40 x 40 x 40 cm e posto in opera a filo della pavimentazione esistente. Al riguardo è opportuno realizzare un cordolo cementizio attorno al tombino per rendere “stabile” il telaio del pozzetto.
- la copertura del tombino è in ghisa, con dimensioni 40 x 40 cm, del tipo a chiusura stagna.
- all’interno del tombino carrabile viene collocato un pozzetto metallico, a sezione quadra o circolare.
- il tubo inclinometrico (uno spezzone normale, non un manicotto) deve emergere all’interno del tombino metallico, libero dal cemento, per 10 centimetri minimo.
- tra le pareti esterne del tubo inclinometrico e le pareti interne del tombino metallico deve esservi uno spazio minimo di 6 cm.

Fig. 14

Ai fini di una migliore identificazione dell'installazione inclinometrica si rileva come il pozzetto in elevazione, o capitello, rappresenti la soluzione più indicata in quanto i pozzetti carrabili, in zone prative o arbustive, tendono ad essere obliterati in poco tempo dalla posa, specie nella stagione primaverile. La soluzione del pozzetto in elevazione è da praticarsi comunque al di fuori di zone urbanizzate o comunque pavimentate ed in assenza di particolari vincoli, impedimenti o servitù di vario tipo.

Per rendere identificabili i pozzetti, in elevazione o carrabili, può essere opportuno installare a loro fianco una palina costituita da un'asta metallica, a diametro minimo 25 mm, sporgente di circa 1,5 m e verniciata a settori bianchi e rossi. In questo caso la testa della palina dovrà essere dotata di tappo di gomma e l'asta dovrà essere inglobata nel manufatto cementizio del pozzetto.

Sull'esterno dei pozzetti, deve essere riportato, con vernice rossa/nera indelebile, l'indicativo del sondaggio

Il sistema di chiusura dei pozzetti più adeguato è rappresentato da lucchetti nautici inossidabili monochiave, uguali per gruppi di inclinometri facenti capo allo stesso sito. Le chiavi, in copia di quattro unità, dovranno essere munite di un cartellino completo delle indicazioni del caso e consegnate al gestore del sito di monitoraggio.

Se possibile il pozzetto deve avere un foro di drenaggio e deve essere posto in modo da non essere perennemente pieno d'acqua.

L'elevazione della testa del tubo inclinometrico, dal livello del terreno, deve essere annotata con precisione, ed indicata nella monografia dell'installazione.

B. RACCOMANDAZIONI RELATIVE ALLA PREPARAZIONE DEL FORO ED ALL'INSTALLAZIONE

La colonna inclinometrica è formata da un assemblaggio di spezzoni di tubo via via collegati fra loro mediante manicotti e calati dall'alto nel foro di sondaggio.

Essa viene installata in un foro di sondaggio preventivamente realizzato che dovrà avere le seguenti caratteristiche:

- diametro sufficiente all'inserimento del tubo inclinometrico (diametro corrispondente alla parte a massima sezione -manicotto con nastro di protezione - di circa 96 mm -, al quale va aggiunto il diametro del tubetto di iniezione): di fatto corrispondente ad un diametro 101 mm tipico dei sondaggi geognostici. In ogni caso il diametro non deve essere superiore a 150 mm;
- deviazione globale dalla verticale (fuori piombo) ≤ 2,5%.

E' di estrema importanza che il fondo della tubazione inclinometrica venga immorsata nel terreno stabile al fine di riferire le letture al fondo della colonna. *Si raccomanda pertanto di intestare la tubazione per almeno 5 metri nel terreno stabile* al fine di poter disporre di una decina di letture sulla colonna da utilizzarsi per le procedure di calibrazione e correzione degli errori.

Una volta installato il tubo inclinometrico (vedi paragrafo B.2), il rivestimento del foro dovrà essere estratto con movimenti di sola trazione e assolutamente senza rotazione della colonna del rivestimento, per evitare danneggiamenti e soprattutto fenomeni di spiralatura del tubo inclinometrico
Per facilitare le operazioni di estrazione della colonna del rivestimento, essa dovrà avere giunti con filettatura M/F senza manicotti o ingrossamenti esterni (colonna liscia), dovrà essere in ottimo stato (senza scampanature in corrispondenza dei giunti filettati) e dovrà essere di notevole spessore (10 mm circa).

Per rendere solidale la colonna inclinometrica al terreno il vuoto esistente tra il tubo inclinometrico e la parete del foro deve essere riempito. Il riempimento (*grouting*) può essere effettuato con boiacca cementizia (cementazione), o con intasamento di sabbia.

Dovrà inoltre essere garantita l'accessibilità al tubo inclinometrico per le letture periodiche.

Le installazioni inclinometriche devono essere svolte da personale esperto, dotato di macchinari ed attrezzature adeguate, in quanto le maggiori difficoltà incontrate nell'interpretazione dei dati inclinometrici derivano da errate o non corrette installazioni, nonché dalla non conoscenza delle procedure da adottarsi per la risoluzione di eventuali problematiche, ad esempio quelle connesse alla fase di riempimento del foro.

Sarebbe, anche, auspicabile il coordinamento in corso d'opera del consulente a cui e' affidata la fase di monitoraggio ed interpretazione dei dati inclinometrici.

Di seguito vengono indicate le principali operazioni per l'installazione di una colonna inclinometrica ed una sintesi delle problematiche derivanti da essa

B.1 Controlli ed operazioni preliminari

Prima dell'inizio della posa in opera è bene effettuare i seguenti controlli:

a) accertarsi che le note tecniche del materiale fornito al cantiere rispettino le specifiche di Capitolato, ad esempio per quanto concerne la certificazione della spiralatura di fabbrica dei tubi inclinometrici;
b) i tubi ed i manicotti non presentino lesioni o schiacciamenti soprattutto nelle parti terminali;
c) le guide interne al tubo inclinometrico siano integre e ben profilate;
d) le estremità dei tubi e dei manicotti non presentino sbavature tali da compromettere il buon accoppiamento di tubi e lo scorrimento della sonda di misura;
e) se utilizzata la valvola di fondo, verificare dell'efficienza del tubo per l'iniezione della miscela di cementazione dalla valvola di fondo ed il corretto montaggio della stessa;
f) controllo e preparazione dei componenti per la realizzazione della miscela di cementazione, costituita da acqua, cemento pozzolanico e bentonite;
g) controllo degli utensili per l'installazione: diametro delle punte del trapano, rivetti, collante, etc.;
h) verifica della quota fondo foro.

B.2 Modalità esecutive di installazione [5]

La posa in opera dei tubi inclinometrici deve seguire le modalità standardizzate sottoriportate:

a) *lavaggio accurato del foro* di sondaggio con acqua pulita o con getto d'aria;
b) *preassemblaggio degli spezzoni di tubo* di 3 metri per formare il primo segmeneto di 6 m terminanti ad un estremo con un manicotto (fig. 15); le giunzioni devono essere realizzate secondo le seguenti modalità:
   - inserimento del manicotto sul tubo per meta della sua lunghezza;
   - esecuzione dei fori per i rivetti (minimo 8 per ogni giunzione), a meno che non si utilizzino i manicotti preforati;
   - introduzione dell'altro tubo ed esecuzione dei fori mantenendo in posizione il manicotto mediante inserimento provvisorio di rivetti;

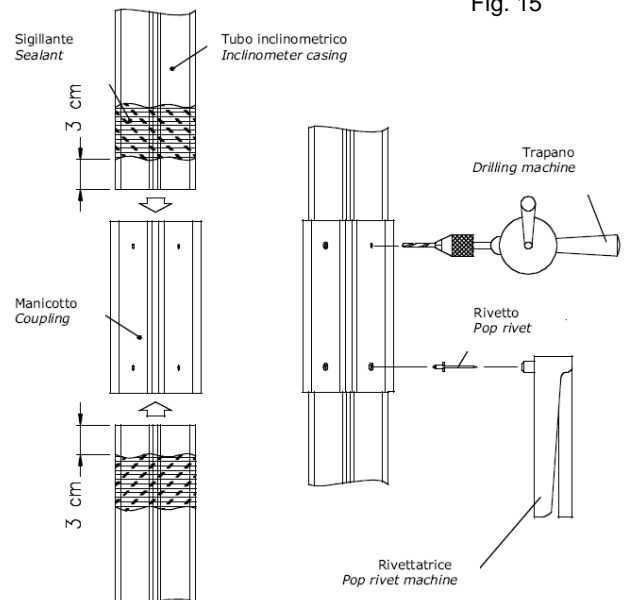



Fig. 15

- rimozione del manicotto;
- stesura di un sottile strato di mastice o di idoneo collante all'estremità dei tubi da giuntare per una lunghezza di circa 15 cm ed attendere per circa 5-10';
- inserimento del primo tubo nel manicotto e rivettaggio;
- inserimento del secondo tubo e rivettaggio;
- procedere con un'abbondante fasciatura del giunto con nastro adesivo autovulcanizzante, in particolare modo sui bordi e sopra i rivetti evitando bruschi movimenti

c) *assemblaggio della valvola/tappo di fondo* sul primo spezzone di tubo, con annotazione della lunghezza totale e montaggio del primo manicotto, fissaggio dell'estremità inferiore del tubo per l'iniezione della miscela cementizia - nel caso in cui il tappo di fondo sia provvisto di apposita valvola unidirezionale per l'iniezione della miscela quest'ultima operazione non sarà necessaria -. Se viene scelto il metodo di iniezione dal basso, mediante tubazione esterna alla colonna, occorre "nastrare" il tubo di iniezione ai diversi spezzoni della colonna inclinometrica;

d) *inserimento del primo spezzone* cosi predisposto nella perforazione (in terreni sotto falda riempire il tubo di acqua per contrastare la spinta di Archimede e favorirne l'affondamento);

e) *bloccaggio del tubo con la cravatta* (pinza serraglio) avendo cura di non deformarlo e di permettere la fuoriuscita di circa 40 ÷ 50 cm di tubo più il manicotto di giunzione;

Fig. 16

f) *inserimento dello spezzone successivo* e foratura, incollaggio, rivettatura e sigillatura del giunto;

g) *calaggio della colonna nel foro* fino a fare sporgere 40 ÷ 50 cm di tubo più il manicotto dopo avere allentato la cravatta; bloccaggio del tubo con la cravatta;

h) inserire nel tubo inclinometrico l'acqua necessaria per diminuire il galleggiamento dello stesso;

i) *completamento della posa della colonna* mediante operazioni simili a quelle sopra descritte provvedendo, ad intervalli opportuni, a fissare al tubo inclinometrico i tubetti di iniezione (se previsti) ed annotando la lunghezza dei tratti di tubo e la posizione dei manicotti;

j) completata la posa della colonna, *inserimento all'interno del tubo inclinometrico dei tubi di iniezione* (se previsti) che vengono agganciati alla valvola di fondo: inizio della cementazione a bassa pressione (max 2 bar) attraverso il tubo di iniezione o attraverso la valvola di fondo. L'operazione si considera ultimata dopo avere osservato, per un congruo intervallo di tempo, la fuoriuscita di miscela in superficie;

k) *estrazione del rivestimento di perforazione* senza l'ausilio della rotazione, operando solo a trazione, non appena la miscela appare in superficie; nella fase di estrazione del rivestimento il rabbocco della miscela potrà essere eseguito da testa foro, per mantenere il livello costante a p.c.; qualora si noti l'abbassamento del livello della miscela il rabbocco dovrà continuare nei giorni successivi. Occorre, inoltre, sostenere la colona inclinometrica, utilizzando la macchina di perforazione, fino a quando la boiacca cementizia ha completato la "presa";

l) terminata la cementazione, *accurato lavaggio* con acqua pulita dell'interno del tubo inclinometrico mediante apposito attrezzo a fori radiali preferibilmente dotato di pattini zigrinati per la pulizia delle guide.

Si evidenzia inoltre che è buona norma proteggere la parte più in superficie della colonna inclinometrica, per i primi 3 metri dal p.c., specie in prossimità di strade carrabili, mediante "incamiciatura" della stessa con un tubo in PVC da edilizia; ciò al fine di prevenire schiacciamenti e deformazioni che possono influire sulla qualità delle misure.

B.2.1 Problematiche della fase di assemblaggio

La procedura di assemblaggio, e inserimento nel foro, della colonna inclinometrica è alquanto delicata ed in tale fase possono determinarsi lesioni o deformazioni della colonna che possono pregiudicarne il successivo utilizzo.

Nel caso la tubazione venga calata entro fori di sondaggio "asciutti" bisogna infatti tenere conto che il mastice utilizzato nei manicotti di giunzione necessita di almeno 24 ore per giungere alla massima resistenza, a fronte ad un tempo di posa della colonna molto più breve; il peso stesso della colonna può determinare lo "strappo" delle giunzioni, specie per tubazioni profonde oltre 30 metri.

Per prevenire la rottura *si raccomanda di seguire le seguenti prescrizioni*:

- utilizzare i rivetti di rinforzo presso le giunture;
- sostenere la tubazione dalla base con un cavetto di acciaio.

Nel caso di fori di sondaggio riempiti di acqua, la spinta idrostatica riducendo il peso della colonna riduce, anche, lo sforzo sui giunti, nel contempo, però, rende difficoltosa la regolare collocazione.
La colonna che è completamente sigillata, mediante le giunzioni "stagne" dei manicotti, subisce un effetto di galleggiamento, questa dovrà essere, pertanto, appesantita riempiendo in parte il tubo con acqua, è anche possibile, anche se di scarsa attuazione in cantiere, applicare dei pesi alla colonna inclinometrica.

Il metodo peggiore per inserire la tubazione nel foro è mediante una spinta dall'alto, applicata con la macchina operatrice: le forze che determinano il "galleggiamento" della colonna inclinometrica (es. spinta idrostatica, attrito tra le pareti del foro) contrastano infatti l'inserimento della stessa e la tubazione, per l'effetto combinato delle forze opposte, è soggetta a compressione, piegandosi e flettendosi in più punti falsando di conseguenza le misurazioni.

Il fenomeno del galleggiamento si può ripresentare anche durante la fase di cementazione del foro con la boiacca cementizia. Questo problema è particolarmente sentito nel caso di grossi diametri di perforazione e per elevate profondità, e può determinare:

- schiacciamento longitudinale ("accartocciamento") della tubazione o rottura e separazione lungo i giunti, laddove sono assenti mastice e rivetti;
- insorgenza di errori di posizionamento durante l'esecuzione delle letture, con entità dell'errore crescente con la curvatura della tubazione [6].

Per prevenire il fenomeno del "galleggiamento" devono essere adottate le seguenti accortezze:

1. rinforzare la tubazione inclinometrica con un tubi di acciaio sospesi o aste di perforazione, poste all'interno di essa ed appoggiate sul tappo di fondo;
2. installare pesi al fondo della tubazione;
3. procedere al riempimento del foro in due tempi, eseguendo non più di 2 o 3 metri di riempimento, nella prima fase, ed attendendone il consolidamento prima di proseguire con la seconda fase.

B.2.2 Problematiche nella fase di riempimento del foro di sondaggio

Come già detto per rendere solidale al terreno la tubazione e per fornire un sostegno alla colonna inclinometrica si esegue il riempimento (*grouting*) dello spazio anulare tra colonna e terreno/rivestimento del foro mediante l'iniezione di miscele cemento/bentonite a bassa pressione.

Il riempimento viene effettuato dal basso, a risalire fino alla superficie, mediante:

a) un tubo di iniezione posto all'interno della colonna inclinometrica (fig. 17);
b) un tubo di iniezione esterno della colonna (fig. 18).

Per l'iniezione all'interno della colonna viene utilizzata una valvola di fondo (*non-return valve, bottom grout valve*) posta alla base della colonna e collegata al tubo di iniezione.
Quando il *grouting* raggiunge la superficie il tubo di iniezione viene scollegato dalla valvola ed il sistema di non ritorno della stessa previene il rifluimento della miscela all'interno della tubazione.

Poiché una piccola quantità di miscela può colare dal tubo di iniezione e aderire al fondo della colonna inclinometrica è necessario pulire immediatamente con acqua pulita. Quando il riempimento è consolidato è possibile estrarre con cautela il rivestimento del foro di sondaggio.

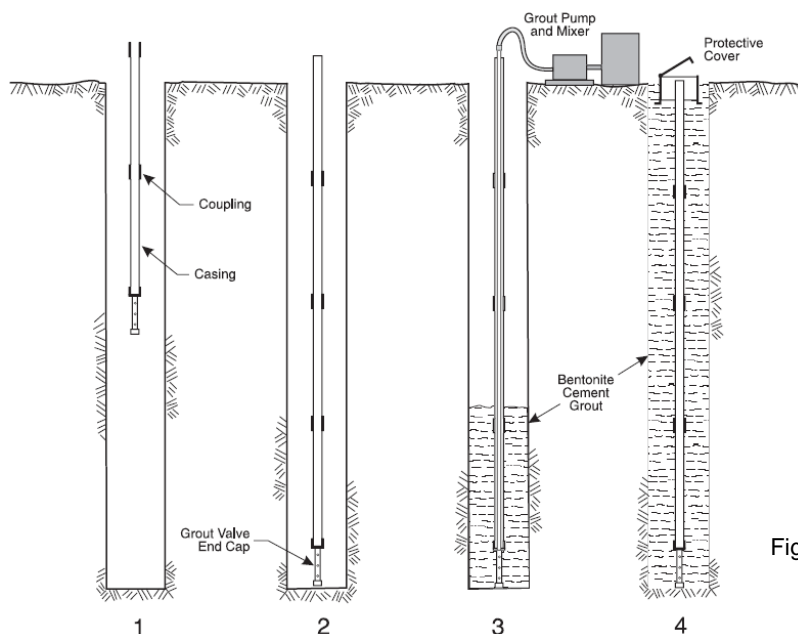



Fig. 17

Una eccessiva pressione della miscela può determinare il sollevamento della colonna inclinometrica, pertanto devono essere adottate le misure preventive descritte al § B.2.1.

<u>Il riempimento attraverso un tubo di iniezione posto all'interno della colonna inclinometrica (fig. 17) nella pratica presenta numerose problematiche che si possono ripercuotere in una non corretta valutazione delle misurazioni:</u>

- il primo rischio e dato dal malfunzionamento del non-ritorno della valvola di fondo che determina il riempimento e conseguente intasamento della colonna inclinometrica. A questo problema si può anche ovviare posizionando una ulteriore valvola, ma determina un incremento dei costi e richiede un foro poco profondo;
- il secondo rischio è che, a causa di perdite del sistema di iniezione, parte della miscela si depositi all'interno della colonna determinando, poi, problemi durante la fase di lettura. In questo caso, per prevenire il fenomeno, è possibile riempire di acqua pulita il tubo di iniezione, prima di scollegarlo dal fondo dal fondo della colonna, e lasciare rifluire l'acqua all'interno della colonna per una sua pulizia completa.

Per le ragioni suesposte **<u>la presente Direttiva consiglia, sotto il profilo tecnico, la tecnica di riempimento "esterna"</u>** (fig.18)**:** esso avviene mediante un tubo di iniezione, normalmente di PVC, che viene fatto aderire alla tubazione inclinometrica, e calato con essa.

Il maggior vantaggio del riempimento eseguito esternamente alla colonna inclinometrica consiste nella impossibilità pratica che parti della miscela aderiscano alle parti interne della colonna, inoltre, se la fase di riempimento si arresta per perdite di miscela entro sacche terreno più permeabili o diasclasi della roccia, si può riprendere dopo aver riempito tali vuoti.

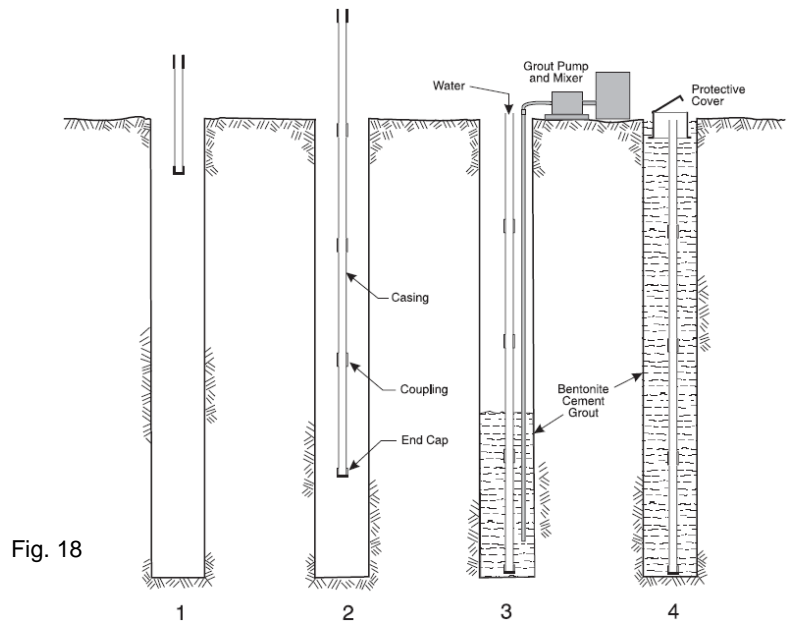



Fig. 18

Caratteristiche composizionali del riempimento e indicazioni generali

La miscela del riempimento anulare è generalmente costituita da un mix di cemento – bentonite – acqua; non vi sono degli standards definiti per le miscele che generalmente variano a seconda dei tipi di suoli (vedi Tab. 5, derivata da *Landslides in Practice*, D.H.Cornforth).

TAB. 5

Miscela Standard		Componenti	Mikkelsen (2002)		Landslide Tecnology	
			Terreni soffici	Terreni da medi a duri	Terreni soffici	Terreni rigidi
100 parti 5-10 parti 20-30 parti 10 parti	 ** 	Acqua Bentonite Cemento Sabbia fine	284 lt 42 Kg 18 Kg *	113 lt 42 Kg 11 Kg *	132 lt 42 Kg 11-17 Kg *	132 lt 85 Kg 5-7 Kg *
		28 giorni per la maturazione	Alla pressione di 0,3 bar	Alla pressione di 3,4 bar	-	-

Nota: peso di 1 sacco di cemento = 50 Kg
(*) è la quantità richiesta per ottenere una miscela idonea al pompaggio
(**) cemento pozzolanico 325

In ammassi molto rigidi, poco fessurati talora si fa ricorso a boiacca più “grassa” in cui viene aumenta la frazione di cemento a discapito della sabbia.
Per terreni a comportamento plastico e/o viscoso (con prevalente frazione coesiva) dovrà essere prevista una cementazione meno rigida aggiungendo sabbia, fino ad eliminare del tutto il cemento.

In presenza di ghiaie permeabili, cavità sotterranee, flussi di falda e una elevata fratturazione del substrato occorre predisporre invece una miscela molto viscosa mescolata, con inclusi di ghiaia fine o sabbia e/o acceleranti.

In linea generale la cementazione con boiacca è sempre preferibile, specie per ammassi rocciosi.

Il riempimento mediante sabbie grossolane uniformi, è meno frequente ed è utilizzato, da alcuni operatori, nei terreni e per installazioni superficiali, inferiori ai 15/16 metri. La sabbia può essere riversata nello spazio anulare in piccole quantità e compattata in posto attraverso spezzoni di palo, operando su strati successivi di piccolo spessore; piccole quantità di acqua vengono aggiunte per prevenire l’insorgenza di vuoti.

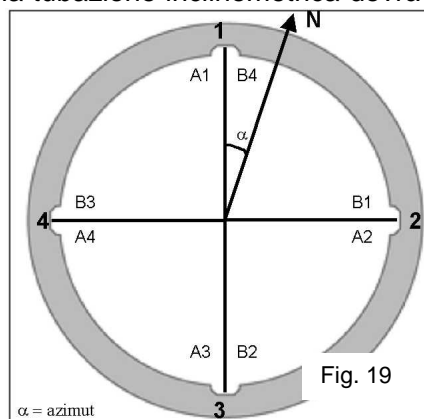
Il riempimento con sabbia viene, anche, utilizzato nel caso di frane con movimenti rapidi (più di 1,5 cm al giorno) ed in presenza di deformazioni plastiche o viscose, nonché per frane dove l’utilizzo di miscela cementizia non è praticabile a causa di difficoltà logistiche.

B.3 Collaudo della tubazione inclinometrica

Prima di procedere alle misurazioni strumentali risulta necessario verificare la funzionalità della colonna inclinometrica. La verifica deve avvenire entro i 5-7 giorni successivi alla posa attraverso il controllo della continuità e dell’allineamento degli spezzoni di tubo.

Risulta opportuno che le operazioni di collaudo e la lettura iniziale di riferimento vengano eseguite dalla Società incaricata del successivo monitoraggio, in contraddittorio con l’Impresa ed alla presenza della Direzione Lavori.

La strumentazione necessaria per il collaudo della tubazione inclinometrica dovrà comprendere una *sonda testimone* per il controllo dell’integrità della tubazione ed una *sonda inclinometrica*, con le caratteristiche tecniche specificate al § A.2 della presente Direttiva, per il controllo della verticalità. Per le installazioni profonde con tubi maggiori di 30 metri, è necessario utilizzare anche una *sonda spiralometrica*, a controllo meccanico, od elettronico, che consente di misurare l’azimut del tubo in ogni sezione, con una sensibilità non inferiore a 0.1°/m.

Fig. 19

Il controllo verrà eseguito calando nel foro la sonda testimone facendola scorrere lungo le due guide del tubo fino a fondo foro,

estraendola e quindi ripetendo l'operazione un'altra volta, dopo aver ruotato la sonda di 90°.

Il tubo inclinometrico è dichiarato idoneo solo se la sonda testimone sarà passata in tutte e quattro le guide senza incontrare ostacoli sia in discesa sia in risalita.

Successivamente dovranno essere anche verificate la verticalità e la spiralatura del tubo, **il tubo inclinometrico è ritenuto idoneo se la deviazione dalla verticale rilevata sarà minore o uguale al 2,5% e la spiralatura totale sarà inferiore a 0,5°/metro lineare.**

Nell'ambito della fase di collaudo si rileva l'opportunità di ricorrere, specie in caso di contenzioso, all'uso della sonda televisiva al fine di verificare "*de facto*" lo stato d'idoneità della tubazione inclinometrica.

Durante il collaudo potrà essere anche identificata la guida di riferimento (guida A1), adottando una opportuna convenzione di orientazione delle guide (vedi schema in fig. 19 rappresentativo della convenzione "azimutale").

B.3.1 Documentazione relativa al collaudo

Gli elementi derivanti dal collaudo dovranno essere annotati in un apposito "**Documento di collaudo**" che dovrà riportare quanto di seguito elencato:

- **informazioni generali**
  - commessa,
  - cantiere,
  - ubicazione (Provincia, Comune , Località),
  - data compilazione,
  - nominativo dell'operatore;
- **misura di deviazione tubazione dalla verticale;**
- **misura della spiralatura** (se eseguita);
- **monografia** di ogni installazione contenente:
  - denominazione del tubo
  - ubicazione plano-altimetrica del tubo in coordinate geografiche Gauss-Boaga, WSG84 e UTM-ED50;
  - data installazione,
  - chiusura con lucchetto (S/N) e riferimenti consegnatario,
  - quota assoluta o relativa della estremità superiore del chiusino di protezione;
  - profondità misurata;
  - riferimento utilizzato per la misura della profondità (testa tubo, bordo pozzetto, ecc.) e quota, o profondità, del riferimento rispetto al piano campagna; il dato deve essere integrato da un semplice schizzo tipo quello di fig. 20;
  - planimetria con l'ubicazione del tubo (stralcio carta tecnica regionale, scala 1:5.000) e descrizione dell'accessibilità, specificando Località, Strada, Provincia;

- una fotografia “di insieme” dell’installazione con rappresentazione del pozzetto e di punti di riferimento riconoscibili e rilocalizzabili (edifici e/o infrastrutture di vario genere, se presenti, o elementi naturali, tipo rocce, alberi ecc.);
- orientamento della guida A1 rispetto al Nord magnetico (comprensivo dell’indicazione dell’angolo azimutale inclinometrico secondo la convenzione definita nella presente Raccomandazione);
- schema della numerazione delle guide;
- una fotografia che illustri la testa del tubo con visibile la guida A1 adeguatamente contrassegnata affiancata da una bussola e ben evidenziata la direzione del Nord magnetico;
- stratigrafia del sondaggio, per fori di sondaggio eseguiti a carotaggio continuo ;
- fotografie ad alta qualità delle cassette di sondaggio;
- tipologia del tubo e dei manicotti di raccordo installati e lunghezza spezzoni qualora vengano utilizzati spezzoni diversi da 3 metri;
- lunghezza dello spezzone di tubo più superficiale (quello che viene tagliato per completare l’installazione) e lunghezza dell’elevazione rispetto al livello del terreno della bocca-tubo;
- caratteristiche della miscela utilizzata per la cementazione del tubo e quantità assorbita durante la cementazione;
- schema di installazione nel foro del tubo inclinometrico;
- breve rapporto sulle modalità di realizzazione del foro, data di perforazione, tipo di riempimento del foro, eventuali problematiche registrate in fase di perforazione;
- la profondità alla quale si è raggiunto il substrato roccioso stabile, fuori dalla zona di frana.

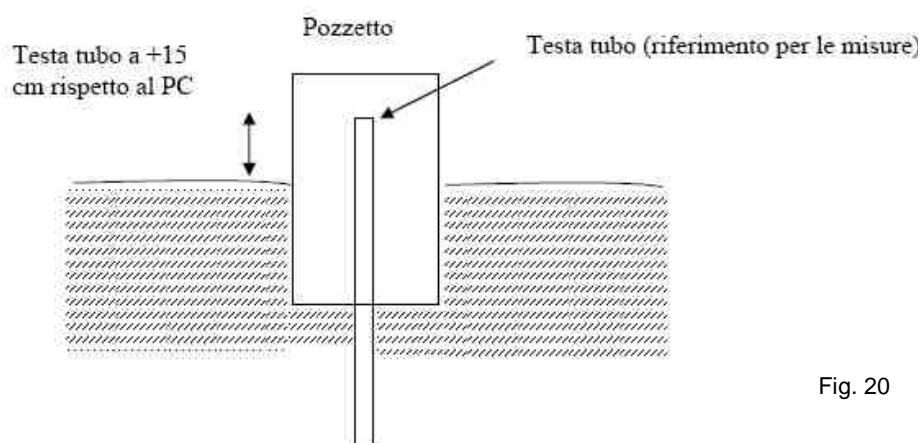



Fig. 20

Nella documentazione di collaudo dovranno essere inoltre indicate le specifiche della strumentazione utilizzata per la verifica della verticalità e della spiralatura, ovvero:

• marca e modello,

• numero di matricola,

• copia del certificato di taratura non antecedente a **un anno** dalla data di misura;
e forniti i listati delle misure eseguite.

C. RACCOMANDAZIONI RELATIVE ALLE SPECIFICHE TECNICHE NELL'ESECUZIONE DELLE MISURE

La lettura inclinometrica, detta anche "misura", consiste nel rilevare, lungo tutta la colonna inclinometrica l'inclinazione della sonda rispetto alla verticale, su piani tra loro ortogonali individuati dalle guide del tubo inclinometrico.

La prima operazione da effettuare prima di iniziare le letture è quella di segnalare con la vernice o con un pennarello indelebile la guida A1 in corrispondenza della testa del tubo; frequentemente col tempo la vernice tende a sbiadire è pertanto consigliabile realizzare, anche, una tacca con una lima o un seghetto

La lettura viene eseguita inserendo la sonda inclinometrica nel tubo ed abbassando la stessa fino a fondo foro; il primo inserimento nel tubo dovrà avvenire in modo che la rotella di riferimento della sonda scorra lungo la guida A1, precedentemente contrassegnata da una tacca di riferimento a testa foro;

Nella presente Direttiva si prescrive l'orientazione degli assi definita convenzionalmente "azimutale" (vedi fig. 19), per la quale la guida A1 dovrà essere quella più vicina al Nord magnetico (l'azimut è l'angolo che la guida A1 forma con il Nord).

Per lo svolgimento delle misurazioni è basilare la scelta del punto di riferimento che verrà utilizzato per individuare i punti di stazionamento della sonda ai diversi intervalli di profondità. Per questa operazione, nei limiti del possibile, è bene utilizzare la carrucola strozzacavo, avendo cura di accertarsi che sia sempre la stessa in tutte le sequenze di lettura che verranno eseguite nel tempo.

Nello specifico il posizionamento della sonda nel tubo, utilizzando il punto di riferimento scelto, deve avere una precisione di +/- 0,6 cm, ciò poiché la precisione globale delle misure deve essere contenuta in 0,2 mm/m di tubo.

La prima lettura è detta "*lettura di zero*" e corrisponde alla lettura a cui fare riferimento ovvero alla lettura rispetto alla quale si calcoleranno nel tempo gli spostamenti della tubazione inclinometrica. Le letture successive sono chiamate "*letture di esercizio*".

E' buona norma effettuare la lettura di zero nei 7-10 giorni successivi l'installazione della tubazione inclinometrica.

La lettura di zero dovrà essere sempre eseguita su quattro guide. Utilizzando le sonde biassiali la prima lettura fornirà i valori dell'inclinazione del tubo, alle varie profondità, nelle otto componenti A1, A2, A3, A4, B1, B2, B3, B4.

Data la fondamentale importanza rivestita dalla lettura di zero, è opportuno procedere con estrema attenzione all'esecuzione della stessa. Per situazioni particolarmente complesse può risultare utile acquisire due letture "di zero" della singola installazione nel corso della visita al sito. Se le due letture sono entrambe

affidabili, e se il software di calcolo utilizzato lo consente, si potrà usare la loro media come misura di riferimento. In caso contrario si dovranno attentamente analizzare i due data-set e, quindi, scegliere quello valutato essere più preciso. Qualora, invece, si dovessero riscontrare evidenti anomalie nelle singole letture di entrambi i data-set, la lettura di zero dovrà essere ripetuta.

A seconda dell’importanza dell’installazione nell’ambito del sito di monitoraggio potrà essere anche valutata l’opportunità di rilevare la quota assoluta della testa del tubo inclinometrico mediante livellazione di precisione.

Ai fini della presente Direttiva le letture di esercizio, dovranno essere eseguite di norma, sulle quattro guide, utilizzando sempre in prima battuta la guida A1-A3, e con passo pari a 0,5 m.

Sulla base di oggettive necessità operative potranno essere svolte letture di esercizio su due guide (A1-A3, B1-B3), che dovranno essere preventivamente concordate, ed autorizzate dal soggetto committente. E’ importante che anche quando si eseguano letture di esercizio sulle due guide venga svolto un ciclo di letture completo sulle quattro guide almeno due volte in un anno solare.

In genere le letture si eseguono dal basso risalendo verso la testa del foro, ad intervalli di 0,5 m: tale procedura consente una rappresentazione più intuitiva, e rigorosa, delle deformazioni/spostamenti, poiché tutte le misure vengono riferite al fondo della colonna inclinometrica, intestata nella parte stabile. In casi particolari (es. per i controllo dei corpi di discarica o di frane con una evoluzione veloce, per le quali si prevede di “perdere” in breve tempo il tratto profondo) è anche possibile procedere dall’alto scendendo verso il fondo: la procedura è analoga a quella dal fondo, considerando che, in questo caso, la prima lettura è quella in testa.

Ai fini della presente Direttiva viene indicato di procedere con la lettura dal basso (in ogni caso nei report di monitoraggio dovrà essere sempre indicato il metodo scelto per l’esecuzione delle misure inclinometriche).

E’ inoltre opportuno eseguire sempre, preventivamente ad ogni ciclo di misurazione, lo stato della tubazione per mezzo della sonda testimone. Facendola scorrere lungo le guide della tubazione per tutta la sua lunghezza, in modo che si possa verificare l'accessibilità delle stesse nonché valutare il rischio di una possibile perdita della sonda per la presenza di eventuali ostruzioni all'interno della tubazione.

C.1 Procedura operativa di esecuzione delle misure

Le letture devono essere eseguite secondo le seguenti modalità:

- installazione della carrucola strozzacavo sulla testa del tubo inclinometrico;
- misura ed annotazione della distanza tra la prima tacca di riscontro sul cavo e le ruote superiori della sonda inclinometrica;
- inserimento della sonda inclinometrica nel tubo inclinometrico e abbassamento della stessa fino a fondo foro; il primo inserimento nel tubo dovrà avvenire in modo che la rotella di riferimento della sonda scorra lungo la guida A1, precedentemente contrassegnata;

- a fondo foro mantenere la sonda ferma per circa 10 minuti, in attesa della completa stabilizzazione della sonda nei confronti della temperatura di fondo foro. I valori che appaiono sul display dovranno cioè risultare costanti, a meno delle cifre decimali;
- abbassamento/sollevamento della sonda fino a far coincidere la prima tacca del cavo con il punto di riferimento selezionato (la sonda si troverà a circa 0,50 m dal fondo foro); le misure dovranno essere eseguite sempre con la tacca del cavo posta in corrispondenza del punto di riferimento;
- inizio delle letture, ad intervalli di 0.5 m, attendendo sempre qualche secondo ad ogni stazionamento per garantire la stabilizzazione dei valori; assicurarsi che la misura più profonda sia eseguita senza che la sonda inclinometrica tocchi sul fondo;
- nel caso in cui, per un errore materiale, ci si dovesse rendere conto di aver saltato un intervallo di stazionamento, riportare la sonda ad una profondità inferiore di almeno un intervallo rispetto alla lettura saltata, quindi riprendere le misure in risalita (questa procedura è attuabile solo se consentita dal software della centralina di acquisizione utilizzata);
- qualora durante una misura non si dovesse riuscire ad eseguire le letture fino alla profondità di origine della tubazione, si procederà ad appoggiare la sonda sul punto di massima profondità comunque raggiungibile e si annoteranno accuratamente i dati di inclinazione e la distanza in centimetri dalla lettura completa più profonda;
- recupero della sonda inclinometrica e, una volta in superficie, rotazione della stessa di 180° e nuovo inserimento della stessa nel tubo inclinometrico, con la rotella di riferimento nella guida A3 (opposta alla guida A1);
- esecuzione delle letture secondo le modalità già descritte;
- <u>per l'esecuzione delle letture sulle 4 guide</u>, una volta terminata l'acquisizione dei dati sulla guida A3, vengono eseguiti i cicli di letture nelle altre guide (nell'ordine A2 e A4);
  - una volta recuperata la sonda fino al piano campagna, rotazione della stessa di 90° in senso antiorario rispetto alla guida A3 e nuovo inserimento della stessa nel tubo inclinometrico, con la rotella di riferimento nella guida A2;
  - esecuzione delle letture;
  - recupero della sonda inclinometrica e, una volta arrivata in superficie, rotazione della stessa di 180° e nuovo inserimento della stessa nel tubo inclinometrico, con la rotella di riferimento nella guida A4 (opposta alla guida A2);
  - esecuzione delle letture.

Per l'eventuale esecuzione delle letture di esercizio <u>sulle due guide</u>, una volta terminata l'acquisizione dei dati sulla guida A1, occorre recuperare la sonda fino al piano di campagna, ruotare la stessa di 180°, procedere al nuovo inserimento della stessa nel tubo inclinometrico, con la rotella di riferimento nella guida opposta e svolgere le letture secondo le modalità già descritte.

D. ANALISI DEI DATASET DI MISURE

Come già evidenziato le misure inclinometriche possono essere affette da errori grossolani e sistematici imputabili a diverse cause possibili.

In linea generale a fronte di letture di spostamento rilevanti, in termini di valore assoluto ed in un contesto di corrette procedure di installazione della colonna inclinometrica e di utilizzo di strumentazione di misura adeguata, l'influenza degli errori sull'entità degli spostamenti rilevati può considerarsi contenuta e, pertanto, le misure relative alla cinematicità dello spostamento possono ritenersi sufficientemente attendibili.

Nel caso, invece, di spostamenti di ridotta entità, appena superiori alla precisione strumentale, il cui valore sia suscettibile di essere influenzato dalla presenza di errori sistematici, i relativi diagrammi inclinometrici risultano di difficile o ambigua interpretazione; in questi casi il processo di riconoscimento ovvero di pulizia degli errori sistematici può risultare necessario. In ogni caso occorre adottare un approccio estremamente "critico" e attento nel condurre l'analisi dati al fine di non incorrere in valutazioni eccessivamente conservative o, al contrario, sottostimare eventuali spostamenti.

E' buona regola condurre una sessione di monitoraggio inclinometrico avendo cura di minimizzare tutte le possibili cause che possono determinare una bassa qualità delle misure, e conseguentemente l'insorgenza di errori che anche se risultano molto contenuti, e poco significativi, sulla singola misura diventano rilevanti, in termini di valore assoluto, quando cumulati tra loro.

Qualora, nel corso dell'esecuzione delle letture, tali condizioni non siano garantite e sorgano dubbi sull'affidabilità delle misure è opportuno non esitare a ripeterle. Questo poiché le operazioni di correzione e post-processing sono alquanto laboriose, di non semplice realizzazione, ed in ogni caso producono un dataset artificiale derivato "a tavolino".

Da ciò discende, pertanto, l'estrema importanza rivestita dalla consapevolezza del grado di accuratezza dei dati che si stanno gestendo e, nel contempo, dell'attenzione che si deve riporre sia nella fase di acquisizione dei dati sul campo sia nella fase di analisi e trattamento [7].

Le "norme" di buona pratica che consentono di limitare le problematiche intrinseche all'esecuzione ed interpretazione delle letture sono le seguenti :

- i dati delle letture devono essere analizzati in tempi brevi dalla loro acquisizione in campagna, lo stesso giorno o pochi giorni dopo; solo così è possibile, nel caso vengano riscontrati errori, procedere ad una immediata correzione e/o ripetizione delle misure e, qualora, si registrino spostamenti evidenti, modificare il programma temporale delle letture;
- i grafici devono essere elaborati con scale opportune per limitare il disturbo prodotto dal rumore strumentale;
- le analisi devono essere sviluppate su letture inclinometriche attendibili e "coerenti". Il caso più comune è quello di confondere l'errore di *bias-shift* con spostamenti del terreno: lo spostamento lungo un piano di taglio è evidente

quando è superiore ad almeno 2-4 mm e le letture di movimento dei punti sopra il piano sono significativamente “traslate” rispetto a quelle sottostanti;

- occorre affidare l’esecuzione delle letture e l’interpretazione dei dati a tecnici che vantino specifiche competenze e forniscano garanzie di qualità;
- occorre eseguire la calibrazione periodica della sonda, utilizzando tutti gli elementi che compongono la catena di misura (sonda, cavo e centralina di misura);

devono, inoltre, essere adottate le procedure esecutive che, seppur in gran parte già dettagliatamente descritte nei capitoli precedenti, si richiamando sinteticamente:

- immorsare la colonna inclinometrica nel terreno stabile;
- effettuazione della lettura di zero sulle quattro guide;
- esecuzione delle letture di esercizio sulle quattro guide;
- verifica della accettabilità/affidabilità dei dataset di lettura;
- le letture di esercizio devono superare i test di accettabilità.

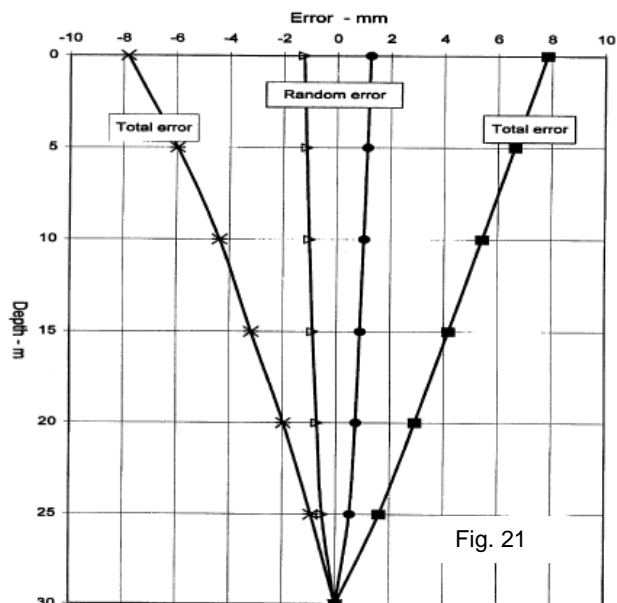
D.1 Accuratezza e precisione delle misure

La letteratura esistente in materia, prodotta in gran parte dalla compagnia statunitense Slope Indicator, riporta che, per una installazione inclinometrica standard di 30 m di lunghezza, sottoposta a letture incrementali con passo di 0,5 m, l’accuratezza del sistema è di circa ± 8 mm (fig. 23).

Nell’ottica di un’attenta gestione delle misure inclinometriche è importante, pertanto, quantificare il grado di accuratezza dei dati che si stanno analizzando; tale parametro può essere anche migliorato, traguardando un corretto equilibrio fra la precisione richiesta ed il conseguente costo delle misure, tenuto, conto che installazioni e procedure di scarsa qualità determinano, in ultimo, una ridotta affidabilità delle misure. In presenza di installazioni perfettamente verticali e prive di eccessiva curvatura è possibile tendere all’obbiettivo massimo di un errore attorno a ± 1,5 mm ogni 30 m semplicemente utilizzando la massima cura in fase di acquisizione delle misure.

Il valore di accuratezza pari a ± 8 mm è considerato cautelativo e deriva dalla somma del contributo degli errori di tipo “random” e di quelli a carattere sistematico (fig. 21).

Fig. 21

Gli errori random sono imputabili alla somma del contributo di una lunga serie di fattori che vanno dalle caratteristiche costruttive dei vari componenti della sonda (servo-accelerometri, connettori, rotelle), del cavo

(tacche di riferimento, allungamento), della centralina di acquisizione (taratura, temperatura di esercizio) e del tubo inclinometrico (inclinazione, parallelismo delle guide, curvatura, ecc.). Va detto che, per lo più, questo tipo di errore tende a rimanere costante in tutte le serie di misure eseguite nella medesima installazione ed il suo valore può essere assimilato al limite di precisione massimo raggiungibile.

Gli errori sistematici, invece, tendono a variare fra una campagna di misure e le altre e possono essere generati da uno dei seguenti fattori, o dalla loro combinazione:

- errore di “scostamento” della sonda (bias-shift);
- deriva di sensibilità della sonda;
- rotazione dell’allineamento del sensore;
- errori di posizionamento di profondità;

questi errori possono essere anche corretti, quando se ne comprende l’origine, a seguito di un’attenta analisi dei dati.

Gli errori random, tipicamente, non superano il valore di ± 0,16 mm per ogni lettura incrementale, ma si accumulano fra loro ad un tasso pari alla radice quadrata del numero di intervalli di lettura: ciò significa che, nel caso dell’installazione standard di 30 m con lettura a intervalli di 0,5 m, l’errore random potrà raggiungere valori inferiori a 1,5 mm in testa tubo.

Gli errori sistematici, al contrario, si cumulano in maniera aritmetica e sono stimati attorno a valori di 0,11 mm per ogni lettura incrementale: ciò implica che, nel caso di cui sopra, in testa tubo si raggiungeranno valori di oltre 6,5 mm.

Vediamo adesso una sintetica descrizione delle tipologie di *errore sistematico* sopra elencate.

- *errore di scostamento della sonda (bias-shift):* questo errore rappresenta una deriva del valore di *bias* (***b***) caratteristico della sonda. Il bias (vedi § 2.3) rappresenta il valore di “non-zero” letto dalla sonda posta in posizione di perfetta verticalità ed è proprio della taratura degli accelerometri. Il valore può essere positivo o negativo e può anche variare nel corso della vita dello strumento per fenomeni di isteresi dello strumento. Il bias può anche cambiare tra installazioni diverse ma diventa un errore quando non viene eliminato con la procedura delle *letture coniugate*;
- *deriva della sensibilità della sonda*: consiste solitamente in un malfunzionamento dell’amplificatore operativo (op-amp) del pre-amplificatore della sonda. Generalmente, questa disfunzione può essere riconosciuta e corretta solo tramite la calibrazione della sonda. Si tratta di un errore abbastanza poco comune e, tuttavia, molto subdolo e fuorviante. Anche per questo, quindi, è opportuno provvedere ad una regolare calibrazione della sonda, con cadenze tanto più ridotte quanto più frequente è il suo utilizzo;
- *rotazione dell’allineamento del sensore*: quest’errore è determinato dalla combinazione dell’inclinazione del tubo con lo scostamento dell’allineamento dell’asse del sensore. Qualsiasi piccola variazione di

allineamento, dell'asse del sensore, fra le letture di esercizio e la lettura di zero è causa di errore quando i tubi inclinometrici presentano sensibili inclinazioni dell'asse ortogonale al sensore. Con un po' di esperienza questi errori possono essere riconosciuti, e anche, corretti tramite una procedura iterativa;

- *errori di posizionamento di profondità*: la combinazione di significativi valori di curvatura del tubo inclinometrico e variazioni nel posizionamento verticale della sonda in fase di acquisizione delle letture origina questa tipologia di errori. La causa delle variazioni nel posizionamento verticale della sonda fra le varie letture eseguite in una medesima installazione sono associate a possibili modificazioni della lunghezza del cavo o spostamenti delle tacche di riferimento, oppure, più spesso, a cambiamenti della lunghezza del tubo, causati dall'assestamento del terreno, ed a errori materiali degli operatori. Anche questi errori possono, con un po' di esperienza, essere riconosciuti ma, tuttavia, sarà necessaria una grande abilità per quantificarne l'entità ed, anche, correggere i data-set.

D.2 Accettabilità delle misure

Per verificare la rispondenza dei dati ai criteri di accettabilità occorre che i dataset vengano sottoposti ad un processo di refertazione di cui deve essere dato adeguato conto nel Report di monitoraggio.

I tale contesto la "*checksum"* rappresenta un termine di grande importanza nel processo di analisi ed elaborazione delle misure e viene definita come la somma delle opposte letture (es. A1+A3) rilevate allo stesso intervallo di profondità.

La ***Checksum***, nel caso "ideale" di una misura eseguita sul banco di taratura equivale al doppio del valore di "non zero" (*bias)* proprio della sonda utilizzata; per la misura dell'inclinazione di 1°, effettuata con u na sonda che presenta un valore di bias (b) pari a 10 digit, risulta infatti:

lettura A1	= A1 + b = (25.000 x sen 1°) + 10	= 436 + 10	= 446	(1)
lettura A3	= A3 + b = (25.000 x sen -1°) + 10	= - 436 +10	= - 426	(2)
Alg. Diff.	= (A1 – A3)	= 436 - (-436) +10 – 10	= 872	(3)
Checksum	= (A1 + A3)	= 436 + (-436) +10 + 10	= 20	(4)

la differenza algebrica delle formule (1) e (2) duplica la lettura e cancella il valore di *bias* in (3). Tale valore di scostamento entra, infatti, nella misura rilevata la quale viene "pulita" mediante la procedura delle letture coniugate (ovvero quando le due letture vengono "combinate" il valore di *bias* viene eliminato ed emerge il valore corretto della misura).

La somma delle opposte letture (4) è invece il Checksum ed il relativo valore è pari a 2b.

Nei casi reali il Checksum presenta un comportamento differente da quello teorico in quanto, come già detto, le misure di campagna sono affette da "condizioni" che vanno ad incidere sulla grandezza misurata cosicché all'interno del dataset, per le diverse profondità di lettura, non viene mantenuto costante il valore di 2b ma si verifica una variazione dello stesso. Ciò non è necessariamente un segnale della presenza di un errore. E', invece, importante che non vi siano valori anomali entro

il *dataset*: il grafico del checksum deve assumere, infatti, un profilo grossomodo verticale, senza eccessive oscillazioni.

Nella figura 22, che rappresenta i grafici del checksum di tre serie di misure, riferite ai canali A e B, è evidente la presenza di picchi entro la serie di valori, per alcune profondità, che indicano inconsistenze nelle letture che devono essere sottoposte a verifica. In particolare gli elevati valori di checksum possono indicare che la sonda non è stata posizionata correttamente, che la lettura è stata acquisita prima della completa stabilizzazione termica o che sono presenti nella tubazione delle ostruzioni che modificano l'assetto di posizione della sonda.
Il grafico di fig. 22A evidenzia, inoltre, la presenza di una deriva della curva riferita al dataset della misura 002, tra il fondo foro e quota – 30 m dal p.c., riconducibile verosimilmente ad una non corretta stabilizzazione termica.

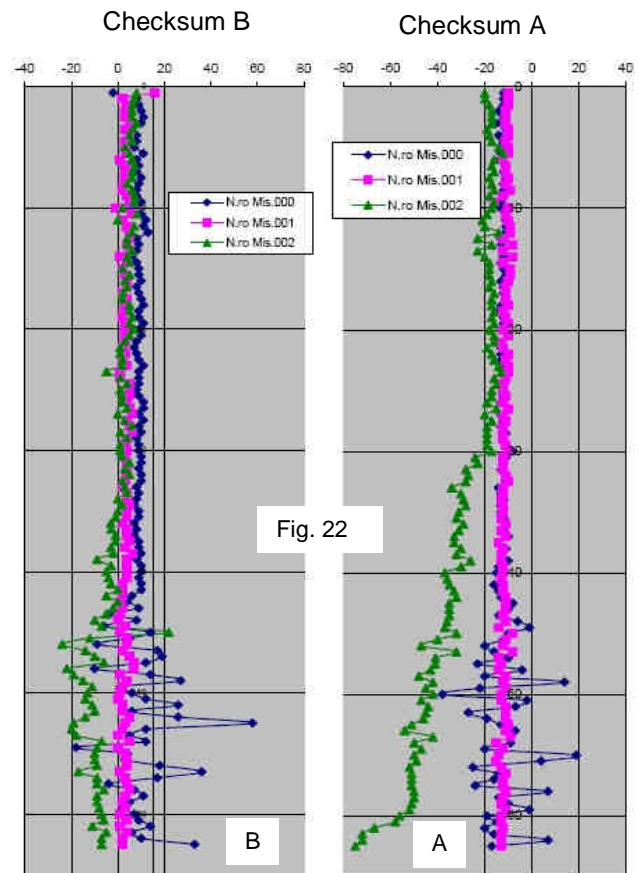
Fig. 22

Il Checksum costituisce, pertanto, il primo strumento di controllo per verificare la qualità ed attendibilità delle letture.

I controlli si esplicano nella verifica di due parametri principali:

a) lo scostamento dei valori di checksum dei singoli intervalli di lettura rispetto alla checksum media, per entrambi gli assi, nell'ambito della stessa lettura oggetto di verifica;
b) lo scostamento della deviazione standard dei valori di checksum della lettura di esercizio oggetto di verifica rispetto a quelli della lettura di zero per entrambi gli assi.

Il controllo di entrambi i parametri sono immediatamente eseguibili (anche sul terreno, qualora si utilizzi una centralina che ne consenta la visualizzazione in *real time*), in quanto i report delle letture solitamente riportano in coda al listato delle acquisizioni i valori della media e della deviazione standard del checksum, nonché il massimo ed il minimo registrato nell'ambito di una data lettura.

Per quanto attiene il parametro di scostamento dei valori di checksum (a), la letteratura esistente in materia stabilisce che, affinché una lettura inclinometrica sia accettabile, i valori di checksum per l'asse A devono essere compresi fra ± 10 digit rispetto al valore medio delle checksum per questo asse (*Esempio*: il valore medio delle checksum per l'asse A in un tubo inclinometrico è pari a 4; i valori di

checksum delle singole misure all'interno di un data-set dovranno essere compresi fra –6 e 14). Per quanto attiene l'asse B l'intervallo di ammissibilità è doppio, cioè ± 20 digit rispetto al valore medio delle checksum per questo asse [8].

In sostanza, questo controllo consente di evidenziare immediatamente l'eventuale presenza di picchi anomali dei valori di checksum nelle singole letture relative ai vari intervalli di profondità.

Relativamente al parametro di scostamento della deviazione standard (b), invece, la letteratura riporta che *i valori di deviazione standard delle checksum sui due assi dovrebbero essere compresi fra 3÷5 unità rispetto al valore di deviazione standard dell'asse omologo per la lettura di zero*.
(*Esempio*: per la lettura di zero di una installazione inclinometrica data il valore di deviazione standard delle checksum per l'asse A è pari a 6 e per l'asse B a 13; le letture di esercizio, per essere ammissibili dovranno avere valori di deviazione standard non superiori a 11 per l'asse A e 18 per l'asse B).

TAB. 6

Esempio di tabella per la verifica della qualità dei dati

	LOCALITA':	**GENOVA**	
	INSTALLAZIONE INCLINOMETRICA:	**S1**	
	LETTURA DEL:	**01/01/2010**	
VERIFICA DELLE CHECKSUM ALL'INTERNO DEL SINGOLO DATA-SET			
Checksum media Asse A		4	
	Range di tolleranza dei valori di checksum	-6 / 14	
	Valori massimo e minimo delle checksum	-3 / 10	
	Valori ammissibili	SI	NO
Checksum media Asse B		-15	
	Range di tolleranza dei valori di checksum	-35 / 5	
	Valori massimo e minimo delle checksum	-32 / -7	
	Valori ammissibili	SI	NO
Deviazione standard della Checksum Asse A lettura di zero		8	
	Massimo valore di deviazione standard della checksum ammissibile	13	
	Valore di deviazione standard della checksum	11	
	Valori ammissibili	SI	NO
Deviazione standard della Checksum Asse B lettura di zero		12	
	Massimo valore di deviazione standard della checksum ammissibile	17	
	Valore di deviazione standard della checksum	13	
	Valori ammissibili	SI	NO

E' importante precisare che ai fini dell'accettabilità di un dataset di lettura di esercizio devono essere verificate contemporaneamente entrambe le condizioni imposte per i valori di checksum e di deviazione standard.

In conformità ai criteri stabiliti in precedenza da questa stessa Direttiva, su installazioni eseguite in contesti logistici privi di particolari criticità e profondità contenuta entro i 30/40 metri devono essere rispettati i limiti di accettabilità sopra riportati.

Sono tollerabili scostamenti del valore di checksum rispetto alla media, superiori rispetto ai range sopra esplicitati (asse A , asse B) solo qualora venga dimostrato che essi sono determinati dalla presenza di un numero di picchi inferiore all'10% del numero degli intervalli di lettura e che, in ogni caso, sia acclarato che la presenza di tali anomalie non inficia la qualità generale della lettura

Nel caso di installazioni particolarmente difficoltose e complesse per ubicazione e lunghezza, il range di 5 unità rispetto al valore di deviazione standard della lettura di zero potrà intendersi raddoppiato.

Nel caso di misure eseguite su installazioni pre-esistenti, delle quali non siano note nel dettaglio le modalità di installazione, i criteri di accettabilità potranno necessariamente essere più larghi, ciò nondimeno il rapporto di monitoraggio dovrà contenere tabelle analoghe a quella riportata nell'esempio di Tab. 6, onde consentire una corretta valutazione circa la reale significatività dei dati.

D.3 Particolari prescrizioni nella conduzione delle misure inclinometriche

- non sottoporre la sonda a urti. Quando la si cala a fondo foro, avere cura di appoggiarla con delicatezza sul fondo. Nel trasporto dell'apparecchiatura inclinometrica, non mettere mai la sonda nel bagagliaio o nel cassone di un camion senza che sia opportunamente fissata in modo da impedire urti e sobbalzi. Qualora la sonda dovesse subire un urto accidentale sarà opportuno provvedere ad un'attenta analisi dell'attendibilità dei dati acquisiti successivamente all'impatto e, eventualmente, provvedere ad una sua taratura e calibrazione presso il produttore;
- provvedere alla connessione della sonda al cavo e di quest'ultimo alla centralina solo in ambienti asciutti al fine di evitare che l'umidità possa interferire con i contatti elettrici;
- non maneggiare la sonda afferrando la stessa per le rotelle;
- evitare di piegare il cavo ad un angolo troppo stretto. A questo proposito, in fase di misurazione è bene utilizzare la carrucola strozzacavo per evitare che il cavo venga piegato appoggiandosi all'estremità tagliente della testa tubo;
- ogni qualvolta si termina una misurazione e si disconnette la sonda dal cavo e dalla centralina pulire e asciugare con cura la sonda stessa e tutti i connettori. Al termine di una campagna di acquisizione in un sito è opportuno provvedere ad oliare leggermente i meccanismi della sonda.

L'aggiudicatario della campagna di misurazioni dovrà eseguire tutte le letture utilizzando la medesima strumentazione (sonda, centralina e cavo) eventuali cambiamenti dovranno essere debitamente evidenziati nella reportistica di monitoraggio.

Dovrà essere sempre utilizzato lo stesso punto di riferimento e tutte le operazioni di misura dovranno essere sempre effettuate nella stessa sequenza, seguendo sempre le stesse procedure.

La bibliografia scientifica e le raccomandazioni tecniche delle case costruttrici indicano che per garantire la continuità delle caratteristiche di precisione del sistema occorre eseguire la calibrazione periodica della sonda, <u>con cadenza almeno annuale</u>, utilizzando tutti gli elementi che compongono la catena di misura (sonda, cavo e centralina di misura). Si precisa *<u>che ai fini della presente Direttiva la cadenza annuale viene</u>* intesa come una condizione minima; infatti, qualora durante il normale utilizzo della strumentazione risultino letture di scarsa qualità, e non accettabili, si dovrà procedere alla immediata verifica e taratura della stessa.

E. ELABORAZIONE - RESTITUZIONE DELLE MISURE, REPORT DI MONITORAGGIO

E.1 Elaborazione

L’analisi dei dati delle letture inclinometriche avviene attraverso elaborazioni di tipo statistico sui dataset che comportano la comparazione delle misure di esercizio rispetto alla posizione iniziale (misura di zero), mentre la misura assoluta della lettura di zero rappresenta la verticalità del tubo.

Le analisi statistiche, la validazione delle letture periodiche e tutte le operazioni di correzione degli errori sistematici vengono svolte da appositi software commerciali. Alcuni di questi programmi, prevedono la possibilità di introdurre correzioni di assetto angolare e di sensibilità dell’apparecchiatura di misura per variazioni intervenute nel tempo, o per sostituzione della stessa, e di svolgere le operazioni di correzione degli errori sistematici.

I dati delle letture inclinometriche sono rappresentati sotto forma di grafici dalla cui interpretazione si può determinare la profondità, la quantità, la direzione dello spostamento e la frequenza dello spostamento nel tempo.

Programmi di calcolo con possibilità di correzioni.

Nel caso di utilizzo di programmi aventi la possibilità di svolgere correzioni *nei tabulati che verranno inviati al soggetto committente dovranno essere ben evidenziati sia i valori nominali della sensibilità che i valori adottati per l’elaborazione.*

Ai fini della presente Direttiva le correzioni per l’assetto angolare (bias) non dovranno essere superiori a ± 2° sessagesimali (mas simo 2° sessagesimali rispetto alla misura origine); per la sensibilità le correzioni non dovranno essere superiori a ± 1% del valore nominale di sensibilità dell’apparecchiatura di misura.

Eventuali correzioni superiori a tali valori devono essere giustificate da motivi eccezionali, ovvero cambio dell’apparecchiatura di misura, sostituzione dei servoaccelerometri, verifiche di taratura periodiche etc.

Caratteristiche minime dei programmi di calcolo.

Il programma deve essere in grado di eseguire elaborazioni sia per spostamento cumulativo differenziale (sommatoria) che per differenziale locale (variazione di inclinazione locale per punti), di riferire gli azimut al NORD, eseguendo una rotazione di assi, in modo da avere per tutti i cantieri un unico sistema di coordinate. Lo stesso programma, tra le funzionalità accessorie, dovrebbe consentire, anche, la valutazione dei checksum - differenza tra una lettura e la coniugata - e consentire la stampa delle medie, per permettere una rapida valutazione della validità della misura.

E.2 Rappresentazione grafica delle lettute

Le diverse tipologie di grafici inclinometrici sono:

			TAB. 7
	GRAFICI STANDARD:		**GRAFICI DIAGNOSTICI**
	Spostamento cumulativo		Deviazione cumulativa
	Spostamento incrementale		Deviazione incrementale
	Grafici spostamento tempo		Checksum e differenza dei checksum

Quasi tutti i programmi applicano una scala automatica ai grafici in maniera da rappresentare i valori massimo e minimo del dataset; questo automatismo, però, può creare problemi interpretativi, risultando, infatti, amplificati anche valori al di sotto della precisione del sistema inclinometrico (+/- 8 mm per 30 metri di profondità), che di fatto rappresentano il “rumore” strumentale, generando forme ambigue che possono essere associate a spostamenti o indurre a dubitare della qualità dei dati.

In molti casi, in presenza di *dataset* di buona qualità relativi ad installazioni prive di spostamenti, la visualizzazione automatica dei grafici fornisce un risultato simile a quello riportato in figura 23A; è sufficiente impostare in maniera adeguata il valore di fondo scala, che generalmente è conveniente fissare a +/- 25 mm, per evidenziare correttamente gli eventuali spostamenti e filtrare il rumore strumentale (vedi figura 23B).

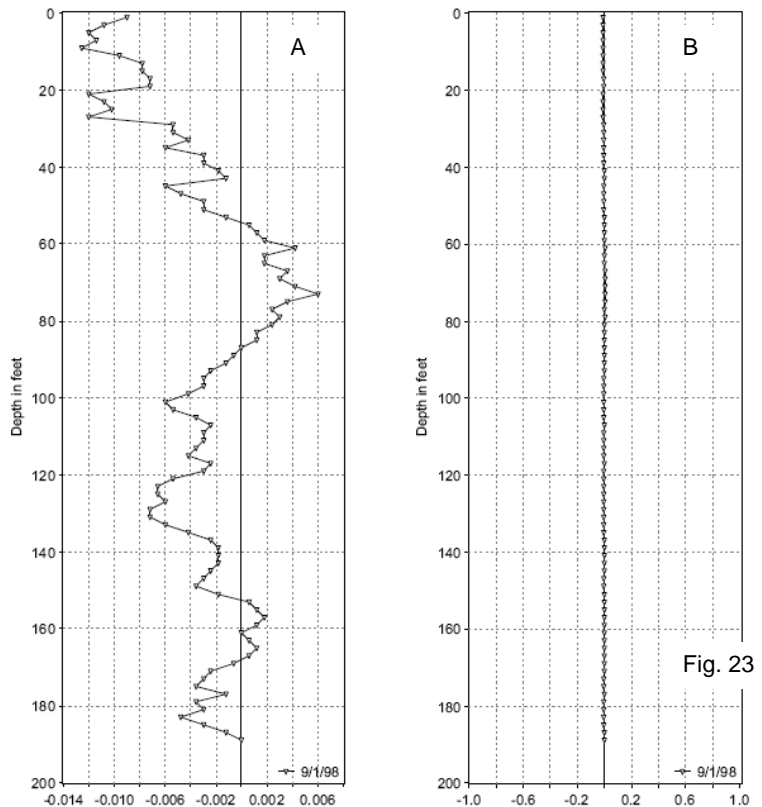



Fig. 23

Qualora le misure di esercizio vengano svolte sulle due guide (A1-A3, B1-B3), è importante, nella fase di elaborazione rispetto alla misura di zero, procedere preliminarmente al “congelamento” delle letture delle guide della misura di zero successivamente non utilizzate

Spostamento cumulativo

Il grafico rappresenta lo spostamento totale per ciascuna serie di letture, riferite alla misura di zero. Su distinti grafici vengono espresse le componenti di spostamento lungo i due assi principali A e B, nonché la risultante di spostamento.

Questo grafico consente di evidenziare in maniera palese la presenza di un piano di scivolamento e la relativa quota, ove esso sia presente.

Fig. 24

E' anche possibile che, in luogo di un piano netto, venga rappresentata una zona di taglio (*shear zone)*, caratterizzata da un andamento curvo piuttosto che da un piano netto (vedi figura 24); in tal caso occorre un'attenta verifica sul *dataset* poiché anche la presenza di errori sistematici cumulati può determinare tale forma, simulando uno spostamento.

In linea generale, ogni volta che il grafico rappresenta curve con forme anomale, fortemente inclinate e molto disperse, occorre procedere ad una valutazione della validità del *dataset* ed alla ricerca di eventuali errori sistematici.

Quando in un grafico vengono rappresentati molti *dataset* la lettura può risultare difficoltosa: in tali casi può essere opportuno rappresentare solo un numero contenuto di dataset significativi

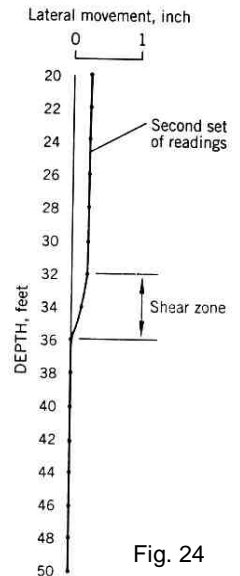
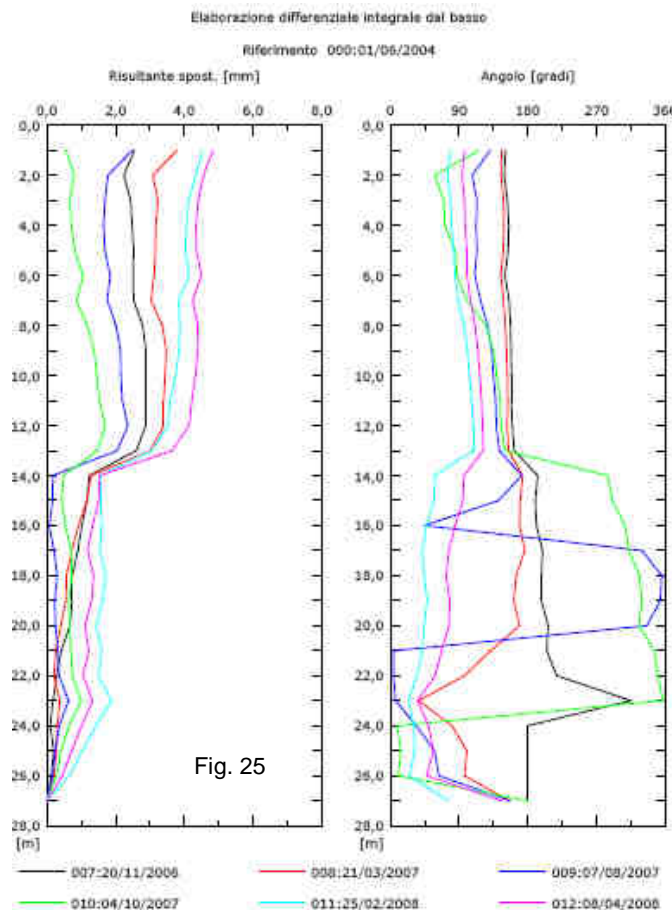



Fig. 25

Solitamente, parallelamente a questo grafico, viene anche rappresentato un diagramma che mostra la direzione azimutale del vettore risultante di spostamento per ogni intervallo di lettura, lungo tutto lo sviluppo della tubazione.

Come nel caso di fig. 25, qualora si registri la presenza di un piano di scivolamento ad una data quota, questo grafico dovrebbe mostare un andamento casuale con forti oscillazioni nella parte stabile, sotto la superficie di taglio, mentre al di

sopra si dovrebbe rilevare una netta isorientazione della direzione azimutale del vettore di spostamento. Ovviamente la isorientazione dovrebbe avvenire grosso modo nella direzione della massima pendenza del versante.

Diagramma polare della deviazione

Rappresenta contemporaneamente l'entità dello spostamento e la direzione in un sistema polare. A volte può risultare poco significativo e poco chiaro, poiché risulta alquanto influenzabile dagli errori sistematici che affliggono le misure. Inoltre non consente di avere informazioni sulla profondità degli spostamenti.

Il suo esame è, tuttavia, sempre necessario per verificare la direzione dei movimenti rispetto al versante e, altresì, per valutarne la coerenza rispetto alle condizioni geomorfologiche.

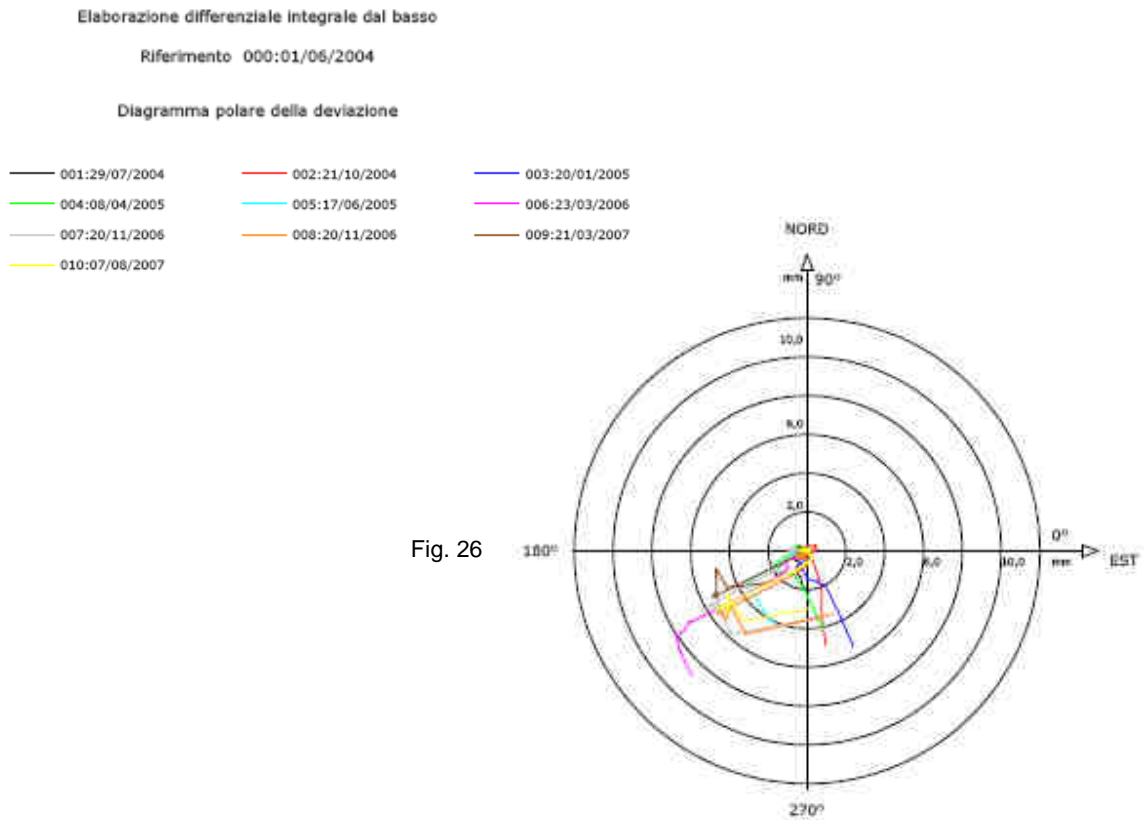



Fig. 26

Spostamento incrementale

Con questo grafico viene rappresentato il contributo “locale” dello spostamento ad ogni singolo intervallo di lettura.
Il grafico riesce a fornire una rappresentazione evidente dello spostamento, e della profondità alla quale questo si verifica: esso è solitamente ben marcato da un picco. Nel caso della figura 27, il piano è localizzabile alla profondità di circa 9 metri dal p.c.

Il grafico degli spostamenti incrementali minimizza gli errori sistematici, poiché il valore rappresentato è affetto unicamente dalla frazione di errore riferito alla quota corrispondente e non contiene la somma cumulata, come nel caso del grafico precedente.

Fig. 27

Nella figura 27 si evidenzia la presenza di picchi minori che, se osservati con attenzione, si presentano ad intervalli regolari di circa 3 metri, ovvero in corrispondenza delle giunzioni degli spezzoni di tubo e, ovviamente, non rappresentano spostamenti reali.

Il grafico mostra in maniera evidente il fenomeno della “deriva di testa tubo”, che si verifica normalmente entro i primi 3 metri dal p.c., dovuto a cause indipendenti da dinamiche gravitative e relative, invece, a problemi di installazione. Si richiama pertanto quanto indicato nella sezione relativa alle procedure di installazione in cui si evidenziava la necessità di incamiciare la parte sommitale della colonna inclinometrica con un tubo in PVC da edilizia.
La deriva di testa tubo si traduce in spostamenti apparenti, occorre pertanto leggere il grafico in esame con molta attenzione avendo, anche, cura di confrontarlo con il grafico dello spostamento cumulato onde evitare di incorrere in errate valutazioni.

E’ importante osservare che spesso, nel corso di lunghi periodi di monitoraggio, la profondità della superficie di scivolamento, ben evidenziata nel grafico di fig. 27 dal picco a –9 metri dal p.c., può subire una sorta di deriva, alzandosi e abbassandosi, rispetto alla quota inizialmente rilevata; ciò è un fenomeno “naturale” connesso alle deformazioni indotte nella tubazione dal movimento rilevato e non rappresenta pertanto l’evidenza di un errore o di un malfunzionamento della sonda.

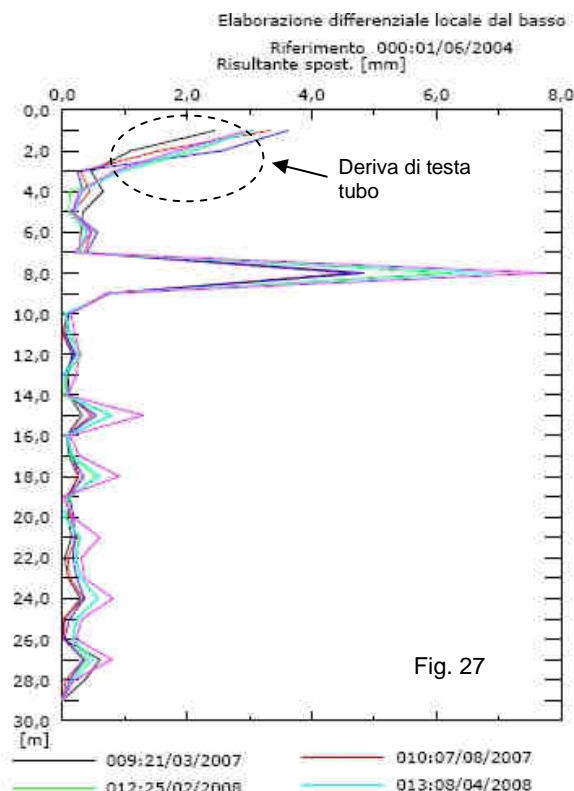
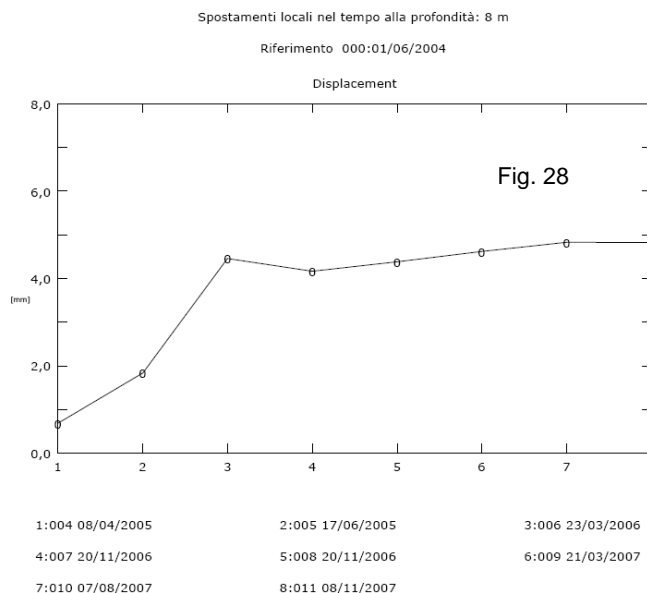



Grafico Spostamento - tempo

A seconda del programma di elaborazione dati possono essere prodotti diversi tipi di grafici bidimensionali che mettono in relazione le grandezze misurate con la profondità, o il tempo, e che costituiscono un utile supporto per la fase di analisi dei dati.

Fig. 28

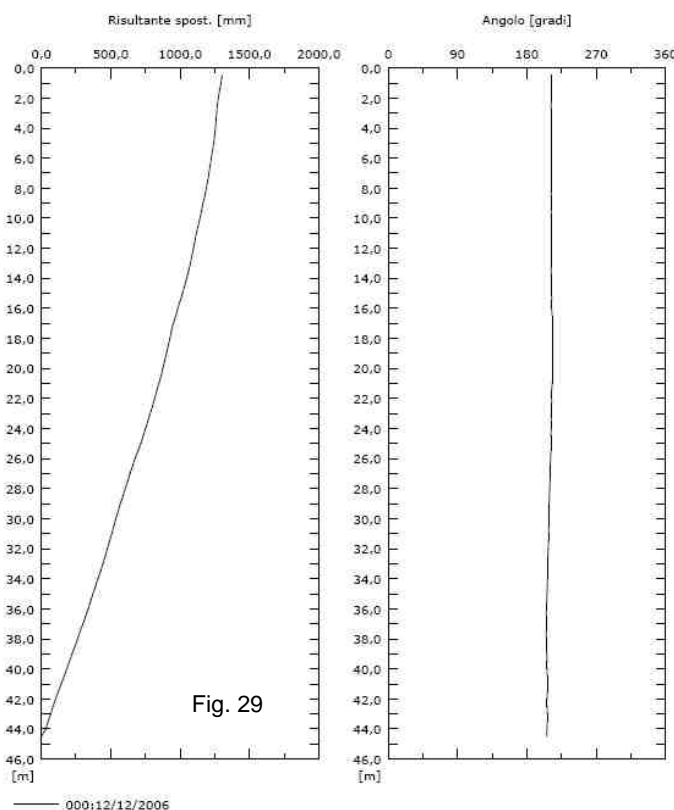
A titolo esemplificativo si riporta il grafico di fig. 28 che mostra il tasso di spostamento nel tempo, ad una data profondità da p.c., per il quale un incremento di pendenza della curva evidenzia un'accelerazione del movimento.

E' opportuno iniziare ad utilizzare questo tipo di grafico non appena viene individuata la quota del piano di scivolamento per monitorarne le caratteristiche cinematiche. E' opportuno utilizzare tutti i dataset di lettura disponibili per aumentare l'affidabilità del tasso di spostamento.

Allo stesso modo del grafico di spostamento incrementale minimizza gli errori sistematici.

Deviazione cumulativa – Spostamento assoluto

Diversamente dalle tipologie illustrate in precedenza, il grafico della deviazione cumulativa non è di tipo "differenziale", cioè non rappresenta il raffronto tra una o più misure di esercizio e la lettura di zero, ma visualizza una grandezza assoluta, riferita ad un solo *dataset*, solitamente quello di riferimento.

Fig. 29

Questo grafico mostra il profilo del tubo inclinometrico rispetto alla verticale. Dato che l'inclinazione della tubazione può contribuire alla generazione degli errori

sistematici, il grafico della deviazione cumulativa viene utilizzato per la diagnosi e la correzione degli errori di “rotazione” (*rotation errors*).

Il grafico viene anche utilizzato per verificare la verticalità del foro ai fini dell’accettabilità dello stesso, che come già anticipato non può superare il 2,5 %. Nel caso della figura 29 il foro presenta una deviazione dalla verticalità pari a 1300 mm su 46 metri corrispondente al 2,8 %, che supera di poco il limite dell’accettabilità.

Deviazione incrementale

Analogamente alla precedente tipologia di grafico, anche in questo caso si tratta della rappresentazione di un unico *dataset*, cioè di una misura assoluta.

Questo grafico rappresenta gli spostamenti laterali della tubazione per ciascun intervallo di letture. Idealmente la tubazione dovrebbe essere in condizione di perfetta verticalità.

Maggiori sono gli scostamenti dalla verticale e maggiore è la curvatura della tubazione.

Gli scostamenti dalla verticale sono potenziali cause della formazione di errori di posizionamento dei livelli di lettura della sonda, perciò tali grafici vengono utilizzati per verificare la presenza di questa tipologia di errore (*depth-error*). Ad esempio, nel caso in esame (fig. 30) si può osservare una significativa “schiacciatura” della colonna inclinometrica nelle porzioni sommitali, verosimilmente causate da spinte eccessive in testa, durante le manovre di installazione

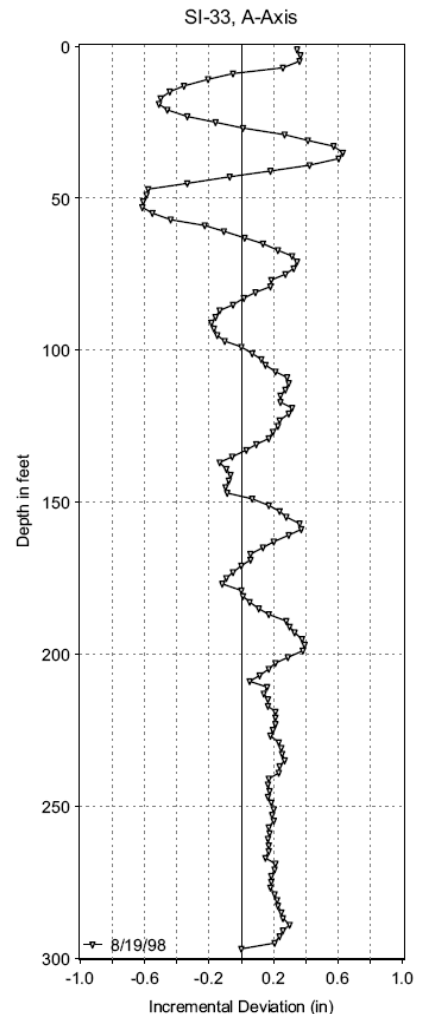



Fig. 30

Grafico del checksum

Questo grafico mostra il valore del checksum per ogni intervallo di lettura e, malgrado non tutti i programmi commerciali ne prevedano la rappresentazione, esso è di grande utilità per valutare la qualità del *dataset*.

Come già evidenziato i picchi della curva indicano letture di scarsa qualità, anche se, in alcuni casi, possono rappresentare un elemento “caratteristico” dell’installazione se si ripetono in maniera costante nei *dataset* successivi relativi alle diverse letture di esercizio, nella medesima installazione.

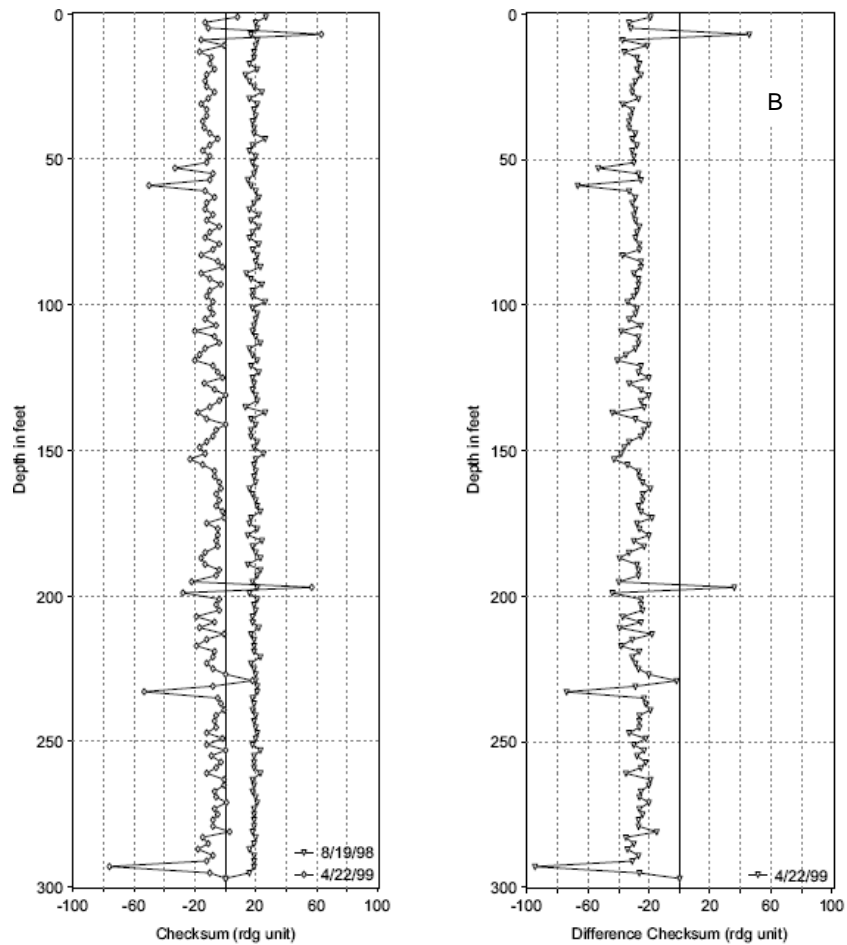



Fig. 31

In figura 31B viene mostrato un grafico particolare, quello della differenza del checksum tra un dataset di letture e la lettura iniziale: questo grafico elimina gli “elementi caratteristici” della tubazione ed evidenzia i cambiamenti nel valore del checksum, che rappresentano potenziali fonti di errore nelle letture.

E.3 Report di monitoraggio

Al termine della lettura di zero dovrà essere consegnata la seguente documentazione:

- **monografia di ogni installazione** (per i contenuti vedi Documentazione di collaudo, §. B.3.1) tale monografia riprenderà, in sostanza, quanto già ricompreso nella documentazione di collaudo, ma dovrà essere integrata con una sintetica relazione circa la qualità dell'installazione e, conseguentemente, circa il potenziale livello di accuratezza conseguibile;
- Un **rapporto** che contenga:
  - una sintetica relazione a commento delle letture effettuate, che riporti l'eventuale esecuzione di serie di letture ripetute su particolari installazioni e l'eventuale utilizzo come lettura di riferimento della media di letture diverse sulla medesima installazione;
  - i listati delle letture ed i rispettivi valori di checksum sugli assi A e B;
  - per ciascun asse, i valori di checksum medio, minimo e massimo.
  - per ciascun asse, il valore di deviazione standard del checksum, dato caratteristico dell'installazione, rispetto al quale verranno svolti i test di accettabilità dei *dataset* delle letture di esercizio;
  - definizione della procedura di lettura adottata (dal basso o dall'alto)
  - definizione della convenzione di orientazione degli assi adottata ("azimutale" o anglosassone)
  - data-set delle letture su supporto informatico nel formato descritto nel § D.4;
  - specifiche della strumentazione di misura (sonda, centralina):
    • marca e modello,
    • numero di matricola,
    • copia del certificato di taratura della sonda; non antecedente a **un anno** dalla data di misura.
    • il valore di costante strumentale (k);
    • i dati di sensibilità nominali della sonda inclinometrica.

Dopo ogni lettura di esercizio:

- tabella di accettabilità delle letture, per ogni singola lettura di esercizio su ogni installazione, sul modello dell'esempio riportato in Tab. 6 al § C.3;
- elaborazione dati rispetto alla lettura di riferimento, secondo il passo con cui e stata effettuata la misura stessa ed alla scala appropriata agli ordini di grandezza riscontrati dei grafici standard e diagnostici precedentemente indicati, relativi agli spostamenti assoluti ed alle componenti di spostamento parziale lungo l'asse N e lungo l'asse E;
- valutazioni circa l'accuratezza delle misure e sul loro significato in relazione all'eventuale evoluzione cinematica dell'area oggetto di monitoraggio.
- relazione sintetica a commento della tabella di cui al punto precedente che giustifichi accuratamente la presenza di eventuali valori di norma non accettabili rispetto ai valori limite previsti;

- *data-set* delle letture su supporto informatico nel formato descritto nel § D.4;
- qualora sia stato necessario intervenire su uno o più specifici *data-set* provvedendo manualmente, in fase di *post-processing*, alla correzione di eventuali errori, la relazione di cui al punto precedente dovrà illustrare puntualmente la tipologia di errore rilevato e corretto e le modalità operative seguite in fase di correzione; in questi casi **dovranno sempre essere consegnati sia i *data-set* originali sia quelli corretti, sia su supporto cartaceo che informatico, anche in formato grezzo di interscambio, con le specifiche tecniche dettagliate nel § D.4.**
- situazione meteo-climatica registrata durante la lettura (temperatura, pioggia,…).

Alla chiusura di ogni ciclo annuale di letture dovrà essere consegnata la seguente documentazione, sia in forma cartacea che su supporto digitale (CD-ROM), in formato compatibile con Microsoft Office, ovvero Adobe Acrobat, e secondo formati standard di esportazione dei file inclinometrici:

- **monografia di ogni installazione** (per i contenuti vedi Documentazione di collaudo, §. B.3.1) uguale a quanto già allegato alla documentazione relativa alla lettura di zero;
- **Report di monitoraggio**, predisposto sotto forma di relazione comprensiva della documentazione grafica necessaria, nella quale vengono descritte: il numero e nominativo degli operatori, le modalità operative svolte per l'esecuzione della misura, le condizioni ambientali e tutte le variabili ritenute significative, eventuali problematiche riscontrate durante la fase di lettura nonché eventuali commenti circa lo stato di funzionalità e conservazione della strumentazione in sito.

  Il Report di monitoraggio dovrà riportare le specifiche della strumentazione di misura (sonda, centralina):
  • marca e modello,
  • numero di matricola,
  • copia del certificato di taratura della sonda; non antecedente a **un anno** la data di esecuzione della misura di zero.
  • il valore di costante strumentale (k);
  • i dati di sensibilità nominali della sonda inclinometrica espressi in valori del seno dell'angolo rispetto alla verticale moltiplicato per il valore di "sensibilità" (k) proprio della sonda
  • eventuali coefficienti di correlazione applicati alla strumentazione utilizzata in fase di rilevazione dati;

  In maniera schematica, oltre quanto già indicato, il Report deve contenere:

- denominazione, produttore ed eventuali dettagli tecnici relativi al software utilizzato per l'elaborazione delle letture;
- schema grafico, o immagine fotografica, indicante il punto di riferimento utilizzato per definire la quota di stazionamento della lettura inclinometrica e l'indicazione del valore di *offset* di questo dalla superficie topografica;
- definizione della procedura di lettura adottata (dal basso o dall'alto)

- definizione della convenzione di orientazione degli assi adottata (“azimutale” o anglosassone)
- elaborazione dati di tutti i cicli di lettura effettuati nell’anno di riferimento - ed eventualmente nelle precedenti annualità - rispetto alla lettura di riferimento, secondo il passo con cui e stata effettuata la misura stessa ed alla scala appropriata agli ordini di grandezza riscontrati dei grafici standard e diagnostici precedentemente indicati, relativi agli spostamenti assoluti ed alle componenti di spostamento parziale lungo l'asse N e lungo l'asse E;
- valutazioni circa l’accuratezza delle misure e sul loro significato in relazione all’eventuale evoluzione cinematica dell’area oggetto di monitoraggio.
- tabella di accettabilità delle letture, per ogni singola lettura di esercizio su ogni installazione, sul modello dell’esempio riportato in Tab. 6 al § C.3;
- relazione sintetica a commento della tabella di cui al punto precedente che giustifichi accuratamente la presenza di eventuali valori di norma non accettabili rispetto ai valori limite previsti;
- *data-set* delle letture su supporto informatico nel formato descritto nel § D.4;
- Qualora sia stato necessario intervenire su uno o più specifici *data-set* provvedendo manualmente, in fase di *post-processing*, alla correzione di eventuali errori, la relazione di cui al punto precedente dovrà illustrare puntualmente la tipologia di errore rilevato e corretto e le modalità operative seguite in fase di correzione; in questi casi **dovranno sempre essere consegnati sia i *data-set* originali sia quelli corretti, sia su supporto cartaceo che informatico, anche in formato grezzo di interscambio, con le specifiche tecniche dettagliate nel § D.4.**

D.4 Archiviazione dei dati su supporto informatico – struttura dei file

Viene qui di seguito descritta la struttura generale dei file di dati da utilizzarsi per la consegna delle letture su supporto informatico.

Nomenclatura dei file

Il nome del file, in accordo con le convenzioni del sistema operativo MS-DOS, sarà costituito da un NOME di 14 caratteri, separato, tramite un punto, dalla ESTENSIONE di 3 caratteri, come di seguito specificato:
Il file è identificato da un nome e da un'estensione.

NOME:
- carattere 1: (fisso = "I"); identificatore di tubi inclinometrici
- caratteri 2-7: sigla identificativa della Provincia e del Comune dove è ubicato il tubo inclinometrico, utilizzando gli appositi codici ISTAT (*es* Prov. GE = 010, Comune di Genova = 025)
- caratteri 8-10: sigla identificativa ed univoca del sondaggio (S1, SS1, S1B). La sigla, formata da caratteri maiuscoli e/o cifre, va attribuita dal fornitore e va ripetuta per tutti i file relativi ad un determinato tubo inclinometrico. Qualora si utilizzi un codice di soli due caratteri inserire un carattere *underscore* (_).
- caratteri 11-14: identificativo univoco della Località.

ESTENSIONE:
- n. progressivo del file dati, coincidente con il n. progressivo di aggiornamento. Va indicato sempre con 3 cifre, eventualmente premettendo degli zeri (es.: 004).

ESEMPIO:

I	0	1	0	0	2	5	_	S	1	S	S	T	E	.	0	0	0

Struttura del file

Il file da fornire è un file di testo, in caratteri ASCII (potrà quindi essere scritto mediante un text editor o apposito software applicativo) ovvero potrà essere prodotto sotto forma di foglio di calcolo Excel. Potrà anche essere scritto tramite l'impiego delle funzioni di esportazioni normalmente previste nei software commerciali, purché secondo formati standard (PRNfile, RPPfile, ORIfile, INCLIfile).
Il file si compone di sezioni delimitate da parole-chiave. La prima sezione è sempre costituita dai dati generali del tubo esaminato, segue, poi, una sezione relativa al *dataset* di lettura.

[4] Il sensore inclinometrico servoassistito è costituito fondamentalmente da un magnete, una bobina mobile, una massa di sbilanciamento e un rilevatore di posizione. Il principio di lettura è basato sulla misura di un segnale elettrico proporzionale al seno dell'angolo tra la verticale e l'asse dell'accelerometro. In pratica nel momento in cui l'asse della bobina non è più verticale nasce una componente *f* della forza di gravita, ortogonale alla verticale, che provoca la rotazione della bobina che, a sua volta, genera un segnale elettrico in un rilevatore di posizione. Tale segnale, confrontato con un segnale di riferimento, genera una corrente *i* che riporta la bobina nella posizione di zero. In definitiva la corrente necessaria a riportare nella posizione iniziale la bobina mobile è proporzionale alla forza che tende a farla ruotare (ossia alla componente *f* della forza di gravita) e quindi all'angolo d'inclinazione α .

[5] Ulteriori dettagli operativi circa l'installazione di tubi inclinometrci, i riferimenti sono riportati in Callotta et al. (1990) "*Il controllo della stabilità dei pendii mediante l'installazione di tubi inclinometrci*" e in Dunnicliff (1993) "*Geothecnical Instrumentation for Monitoring Field Performance".*

[6] Ad esempio se la variazione dell'inclinazione tra due intervalli di lettura successive è pari a 2 gradi e la sonda è posizionata a 25 mm dalla profondità corretta, l'errore sulla lettura dovuto al posizionamento potrebbe essere pari +/-1 mm.

[7] La relativa facilità con cui le letture inclinometriche vengono effettuate, la registrazione automatica e l'elaborazione dei dati attraverso software preconfezionati, consentono di produrre buoni risultati in tempi rapidi, ma alimentano contemporaneamente la tentazione di rilasciare rapporti di monitoraggio senza aver effettuato un adeguato controllo dei data set acquisiti (Mikkelsen P. E., 2003).

[8] I valori di deviazione standard delle checksum usualmente non sono superiori a 8 per l'asse A ed a 16 per l'asse B.

PARTE SECONDA

PARTE SECONDA

A. CONVENZIONI DEGLI ASSI E DELLE GUIDE DA ADOTTARSI PER LO SVOLGIMENTO DELLE LETTURE

A.1 Orientazione degli assi

Le misure e le relative elaborazioni sono riferite ad un sistema di assi cartesiani (X-Y) così orientato:

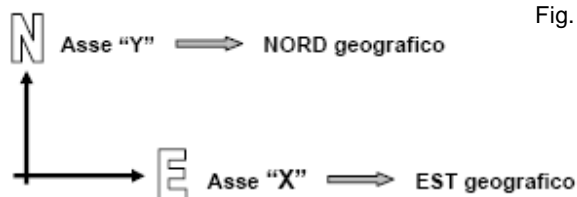



Fig. 32

A.2 Orientazione delle guide: convenzione "azimutale"

Si considera l'orientazione angolare della guida di riferimento (guida 1) rispetto al Nord geografico secondo la convenzione rappresentata nella figura a lato (fig. 33), in cui si definisce un "*azimut inclinometrico*" [9] rappresentato dall'angolo formato tra la direzione del Nord e l'allineamento delle guide 1-3, con il segno così definito:

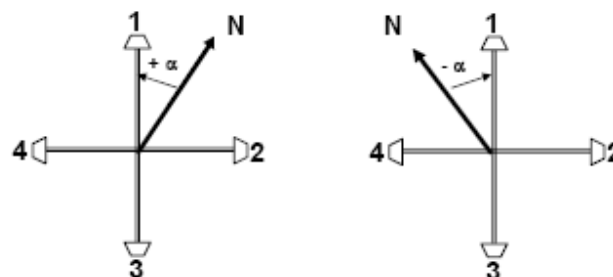



Fig. 33

- se il Nord si trova nel quadrante definito dalle guide 1 e 2, l'angolo è considerato positivo (si considera positivo il senso antiorario dell'angolo da Nord della guida 1);
- se il Nord si trova nel quadrante definito dalle guide 1 e 4, l'angolo è considerato negativo.

Si noti che l'azimut inclinometrico dovrebbe essere sempre ≤ 45° se si è assunta come guida di riferimento la guida più prossima al Nord. Particolari condizioni operative possono comunque modificare le scelte della guida di riferimento, per cui l'azimut inclinometrico può assumere valori > 45°, va comunque mantenuta la convenzione di segno indicata.

Avendo identificato la guida di riferimento come precedentemente descritto, le 4 guide del tubo vengono così definite:

- Guida 1: coincide con la guida di riferimento
- Guida 2: guida a 90° in senso orario rispetto all a guida 1
- Guida 3: guida contrapposta alla guida 1
- Guida 4: guida contrapposta alla guida 2

La convenzione "anglosassone" prevede che la guida principale (guida G1) sia orientata in maniera coincidente alla direzione di massima pendenza (downhill)

che può assumere qualsiasi orientazione rispetto al Nord magnetico. A seconda del software utilizzato per l'interpretazione delle letture occorrerà prestare la massima attenzione nell'inserimento del valore dell'orientazione azimutale della guida principale.

A.3 Rotella di riferimento

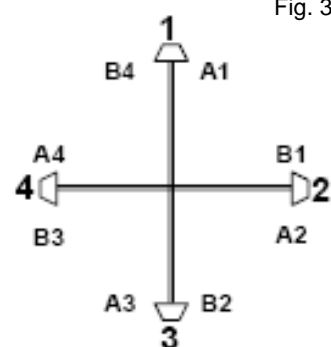
Ogni sonda inclinometrica ha una rotella di riferimento che viene indicata dal costruttore. La rotella di riferimento è utilizzata per garantire la corretta orientazione delle misure e per la scelta delle costanti di calcolo.

B. CONVENZIONI DELLE LETTURE

B.1 Letture

Utilizzando l'identificazione delle guide sopradescritta, le letture effettuate nei tubi vengono così identificate:

Fig. 34

- Misure eseguite con la rotella di riferimento nella guida 1: letture A1 e B1
- Misure eseguite con la rotella di riferimento nella guida 2: letture A2 e B2
- Misure eseguite con la rotella di riferimento nella guida 3: letture A3 e B3
- Misure eseguite con la rotella di riferimento nella guida 4: letture A4 e B4

B.2 Numerazione delle letture

Le letture eseguite nel tubo alle varie profondità vengono numerate a partire dall'alto anche quando le misure vengono eseguite a partire da fondo tubo

B.3 Convenzione di segno delle letture

Il segno delle misure è funzione della sonda utilizzata. In genere viene utilizzata la seguente convenzione:

− *Misura A positiva (A+): quando, con la sonda in posizione verticale, tenendo fermo il piede della sonda, la si inclina nella direzione della rotella di riferimento; misura negativa quando la si inclina nella direzione opposta;*

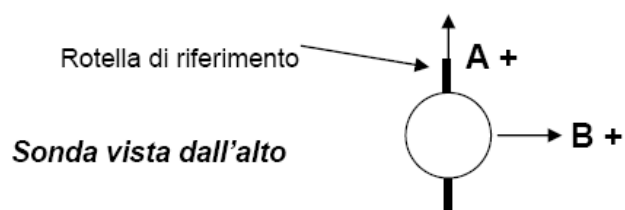
− *Misura B positiva (B+) quando, con la sonda in posizione verticale, tenendo fermo il piede della sonda, la si inclina lungo la direzione a 90° in senso orario rispetto alla direzione della rotella di riferimento; misura negativa quando la si inclina lungo la direzione opposta.*

Rotella di riferimento

A +

Sonda vista dall'alto

B +

Fig. 35

B.4 Costante di sensibilità della sonda “K”

La costante “K” rappresenta la sensibilità della sonda, ovvero il fattore moltiplicativo del valore sen α letto dai sensori della sonda stessa. Può essere impostato in funzione della sonda utilizzata; in genere è pari a 20.000 o 25.000.

B.5 Spiralatura

Diversi programmi di elaborazione prevedono l’introduzione della “spiralatura dei tubi” per compensare la variazione di orientazione delle guide con la profondità, dovuta alle tolleranze di produzione dei tubi o alle attività di posa in opera delle colonne inclinometriche. Il segno della spiralatura deve essere stabilito con riferimento all'orientamento delle guide. In genere si utilizza la convenzione di considerare positive le spiralature per cui il tubo ruota, alle varie profondità, in senso orario rispetto alla sezione di testa.

L’effetto della spiralatura è di variare il risultato della direzione reale di uno spostamento.

C. MANUTENZIONE DEL SISTEMA INCLINOMETRICO

I tubi inclinometrici possono essere soggetti nel tempo, oltre che a deformazioni, a fenomeni di corrosione, intasamento o formazione di incrostazioni (in presenza di acque ricche di sali) che impediscano il passaggio della sonda inclinometrica, in questi casi, si può procedere ad un lavaggio/spurgo della colonna inclinometrica per rimuovere le ostruzioni o, anche, utilizzare appositi "scovoli". Il lavaggio viene effettuato con un getto di acqua a bassa pressione, eventualmente addittivata con tensioattivi o acidi.

Poiché l'operazione è relativamente complessa sotto il profilo organizzativo ed anche onerosa (circa 3.000-4.000 €) è buona norma che venga eseguita una preliminare ispezione mediante telecamera da foro al fine di verificare l'opportunità di procedere alla pulizia ed individuare, anche, il tratto ostruito.

Occorre inoltre porre attenzione alla manutenzione della testa dei tubi, perché non subisca danneggiamenti per urti o schiacciamenti che precludano l'accesso della sonda o possano invalidare l'eventuale riferimento topografico realizzato a testa tubo.

Manutenzione della sonda

La sonda inclinometrica è equipaggiata con sensori di alta precisione. Per questa ragione è importante maneggiarla con cura evitando urti accidentali, sia durante il trasporto che l'uso e usare sempre la sua valigia protettiva durante il trasporto e l'immagazzinamento.

Al termine della campagna di misura occorre pulire la sonda con acqua e lubrificare i carrelli, prima di riporla nella valigetta di trasporto.

La lubrificazione dei carrelli deve essere effettuata con una piccola quantità di lubrificante su entrambi i lati delle rotelle.
Occorre, inoltre, verificare il gioco dei carrelli e delle rotelle: queste devono ruotare facilmente e non devono oscillare sul perno. Analogamente occorre verificarne la capacità di ritorno alla massima estensione dei carrelli.

I carrelli e le ruote costituiscono un elemento di fondamentale importanza ai fini della qualità delle misure: devono presentare minimo gioco assiale e laterale. Se si dovessero notare giochi o malfunzionamenti le rotelle ed il carrello devono essere sostituiti e la sonda ritarata.

Rimuovere il tappo protettivo dalla sonda, pulire ed eventualmente asciugare il connettore. La pulizia di tutti i connettori va effettuata utilizzando alcool evitando sostanze contenenti solventi che potrebbero danneggiarli. Per consentire al connettore di asciugare completamente è opportuno rimuovere il tappo e lasciare asciugare all'aria per alcune ore.
Pulire e lubrificare la guarnizione stagna di tenuta (O-ring) utilizzando un apposito lubrificante a base di silicone. Non utilizzare lubrificante tipo WD-40 o altri lubrificanti spray contenenti solventi clorinati.

Se non usati per lungo periodo, la sonda ed i suoi accessori vanno immagazzinati in luogo asciutto. La sonda, per quanto possibile, va immagazzinata sempre in posizione verticale.

Manutenzione cavo

Il continuo svolgimento e riavvolgimento del cavo può provocare, se impropriamente effettuato, stiramenti e arrotolamenti nei conduttori introducendo problemi di difficile e mai tempestiva individuazione. Per tali ragioni il cavo deve essere sempre riavvolto sull'apposito rullo porta cavo.
Come per la sonda, alla fine di ogni singola campagna di misura pulire il cavo in acqua ed asciugarlo. Rimuovere i tappi di protezione dai connettori e pulirli usando le stesse precauzioni adottate per il connettore della sonda. Quando non utilizzati proteggere sempre i connettori con i relativi tappi.

Manutenzione connettori

Quando il connettore di misura non è usato, proteggerlo con il suo cappuccio. Non pulire i contatti del connettore con spray lubrificanti o sostanze per la pulizia componenti elettrici. I componenti chimici di questi prodotti possono, infatti, corrodere il neoprene presente all'interno del connettore. Per la pulizia usare cotone imbevuto con una piccola quantità di alcool. Non schiacciare o piegare i "pin" del connettore.

Manutenzione batteria centraline

Quando l'unità non è utilizzata per lunghi periodi, dovrebbe essere lasciata connessa alla carica. Questo assicurerà alle batterie un mantenimento della carica propria e, quindi, una riduzione del rischio di batterie scariche. In generale, per la tipologia di batterie utilizzate, non vi sono problemi se l'unità viene lasciata in carica.

D. RICONOSCIMENTO DEGLI ERRORI SISTEMATICI

Le campagne di letture inclinometriche condotte con attenzione producono solitamente risultati adeguati, ma poiché i risultati delle letture non sono mai privi di errori accade talvolta che la combinazione di più errori influenzino le letture producendo falsi indizi di spostamento.

Gli errori sistematici statisticamente, presentano una potenzialità di accadimento molto superiore al verificarsi di spostamento reali.

L'individuazione degli errori avviene, in genere, attraverso il confronto della forma del grafico inclinometrico derivante dalle letture con forme "tipo" caratteristiche delle diverse tipologie di errore: qualora venga riscontrata una forte somiglianza si tenta di eseguire la correzione dell'errore, adottando procedure di tipo matematico.

Per il riconoscimento degli errori vengono indicati i seguenti principi generali:

- un grafico relativo ad uno spostamento reale deve presentare forme nettamente diverse da quelle caratterizzanti gli errori sistematici;
- le installazioni inclinometriche di elevato sviluppo sono maggiormente soggette a generare errori a causa di:
  - problemi di deriva termica tra la superficie del foro ed il fondo;
  - difficoltà a mantenere la verticalità del foro, con conseguente elevata inclinazione della colonna nelle parti più profonde;
  - grande distanza tra la testa tubo e il *reference point*, fissato al fondo.

D.1 Errore di Bias-Shift

Questo tipo di errore, generalmente noto come "*bias-shift*" ("zero shift" o "offset error") rappresenta il più comune errore sistematico e nello stesso tempo quello più facile da individuare (e correggere).
Si manifesta come una deviazione "a ventaglio" dei diversi grafici rappresentativi dei dataset delle letture successive che risultano fortemente ruotati rispetto alla verticale, intorno ad un punto posto alla base della tubazione.

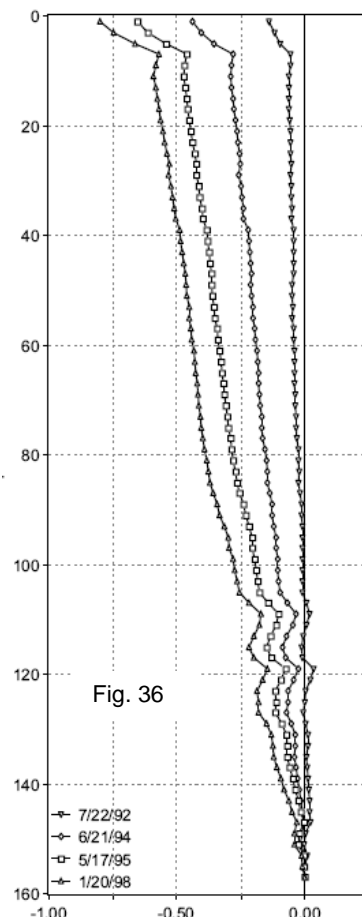
L'errore viene a determinarsi, come già anticipato nel capitolo in cui è stato definito il *bias*, tra le letture coniugate di un *dataset* (A1-A3 e B1-B3) e non può essere eliminato attraverso la semplice differenza algebrica delle opposte letture (*reduction procedure*) - che viene effettuata in automatico del software di elaborazione delle letture -. Infatti a seguito dell'esecuzione di tale procedura permane un variazione di bias fra le letture delle guide opposte che è appunto il *bias-shift*.

L'errore è, inoltre, di tipo sistematico, pertanto un valore costante (di errore) viene aggiunto a ciascuna lettura che, sul grafico degli spostamenti cumulati, viene rappresentato come un incremento lineare; nel grafico di fig. 36 ciascun *dataset* è pertanto affetto da un errore di *bias-shift*.

Sebbene già indicate in altre parti del documento si richiamano le cause che determinano l'errore di bias (*bias-shift)*, che sono le seguenti:

- scarsa cautela nel maneggiare la sonda: una caduta della sonda o urti della stessa determinano variazioni del bias strumentale. Ad esempio, può accadere che l'operatore urti con la sonda la carrucola ferma-cavo quando ruota la sonda per effettuare la prima o seconda lettura coniugata;
- forti variazioni di temperatura lungo lo sviluppo della tubazione inclinometrica (*warm-up drift*): nei manuali tecnici dei costruttori delle sonde viene consigliato di dare tensione alla centralina quando la sonda si trova al fondo della tubazione ed attendere per almeno 10 minuti prima di iniziare le acquisizioni per consentire alla sonda di riequilibrarsi con la temperatura del foro. Se tale indirizzo viene disatteso le letture registrate per i primi 10 minuti saranno affette dall'errore di *bias-shift* e, quando restituite sul grafico, l'errore di bias mostrerà un movimento apparente nella parte terminale della tubazione.

Fig. 36

E' opportuno evidenziare che l'errore di bias prodotto dalla deriva termica dei sensori non è propriamente "sistematico", pertanto, non vi è la garanzia di giungere ad una sua completa eliminazione. Conseguentemente, quando dal grafico dei checksum viene evidenziata la deriva di warm-up drift, qualora venga utilizzata una centralina che ne consenta la visualizzazione già in fase di acquisizione, sarebbe opportuno scartare il dataset e ripetere immediatamente le misure.

<u>*Identificazione del bias-shift error*</u>

L'errore viene identificato graficamente attraverso il confronto della forma delle curve dello spostamento incrementale e dello spostamento cumulativo che sono di seguito rappresentate:

- tipo 1: il valore di *bias* viene alterato nel passaggio tra le letture 0 e 180, in questo caso i valori del checksum risultano relativamente costanti; questa è la forma più comune e la più semplice da correggere;

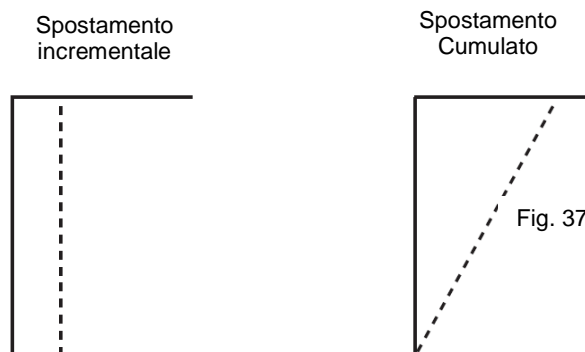
Fig. 37

- tipo 2: il valore di bias viene alterato una volta durante lo scorrimento lungo la tubazione, senza che sia possibile discernere se ciò è accaduto durante le letture 0 o 180. Il checksum risulta alterato per un tratto dopodiché ritorna ad essere costante;

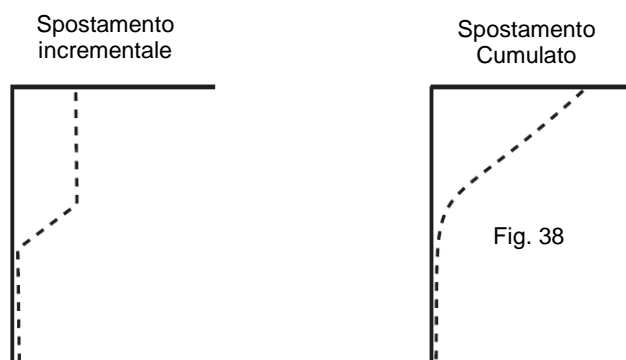
Fig. 38

- tipo 3: il checksum risulta deviato due volte.

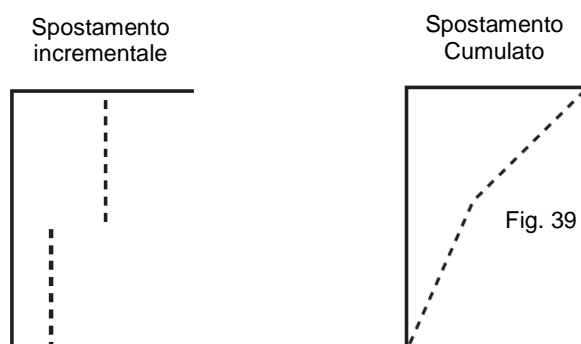
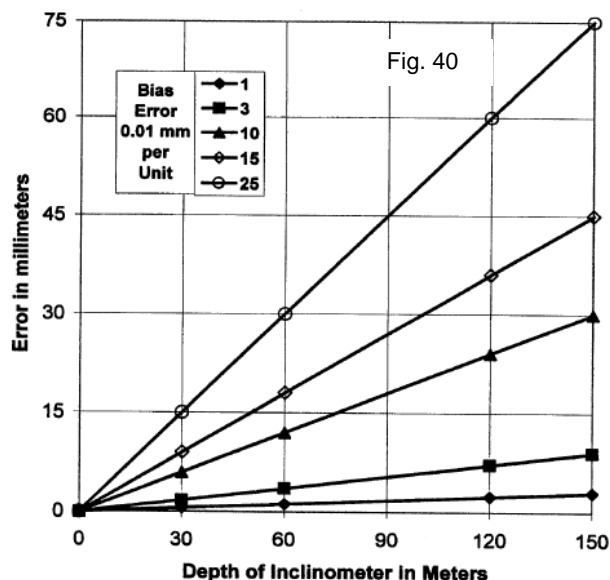
Fig. 39

In genere l’errore di bias-shitf presenta un valore relativamente piccolo, solitamente inferiore a 25 digit (0.25 mm), ed è nettamente distinguibile e differente dagli spostamenti reali, i quali tendono ad essere più elevati in valore assoluto e dovrebbero essere anche uguali ed opposti in polarità nelle opposte letture di A1 e A3. E’ bene sottolineare che la correzione dell’errore di bias diviene alquanto problematica per le installazioni profonde e per le frane caratterizzate da movimenti impulsivi.

Fig. 40

Qualora il valore di scostamento/errore di bias per l’asse A superi il valore di 20 digit, è opportuno eseguire la verifica della sonda, mediante taratura o sostituzione dei sensori.
Nel caso, invece, lo scostamento presenti un valore entro i 10 digit può essere considerato accettabile nell’ambito della precisione del sistema.

La magnitudo dell'errore di bias è crescente secondo una funzione lineare con la profondità della tubazione, come mostrato nel grafico di fig. 40, che evidenzia come un errore di bias di 25 unit determini, per una tubazione lunga 60 metri, un errore sulla lettura di spostamento cumulata pari a 30 mm.

Nei grafici di fig. 41 viene evidenziata la curva dello spostamento cumulativo relativa ad una serie di letture affette da errori di bias-shift (parte sinistra) e nella parte destra le stesse curve "pulite" dagli errori, come si vede sono stati utilizzati valori di correzione (offset corrections) differenti per ciascun dataset.

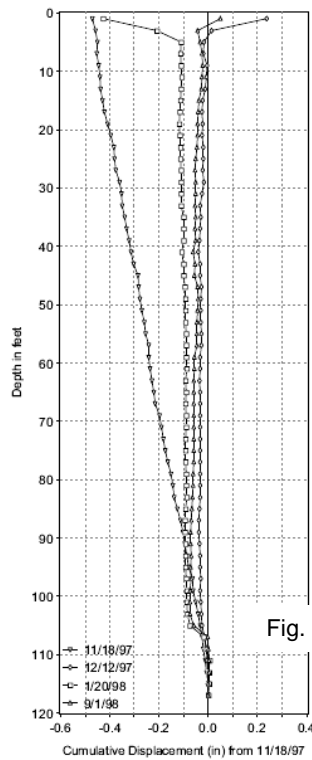
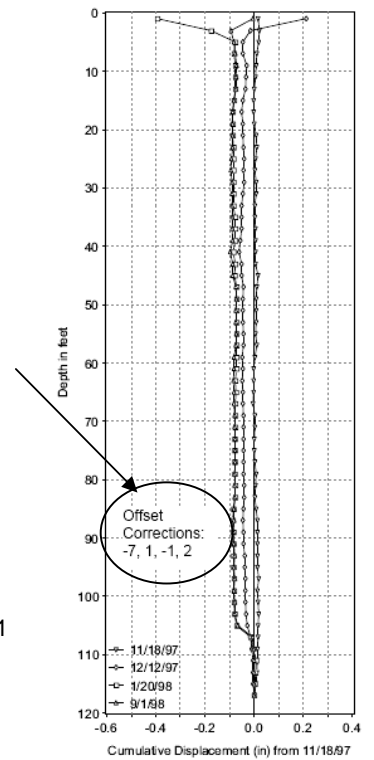



Fig. 41

D.2 Errori di Rotazione

Gli errori di rotazione sono dovuti a piccoli cambiamenti nell'allineamento dell'asse di misurazione della sonda inclinometrica. Tali scostamenti sono di norma molto piccoli, inferiori ad un grado, ed all'interno della precisione del sistema sonda.

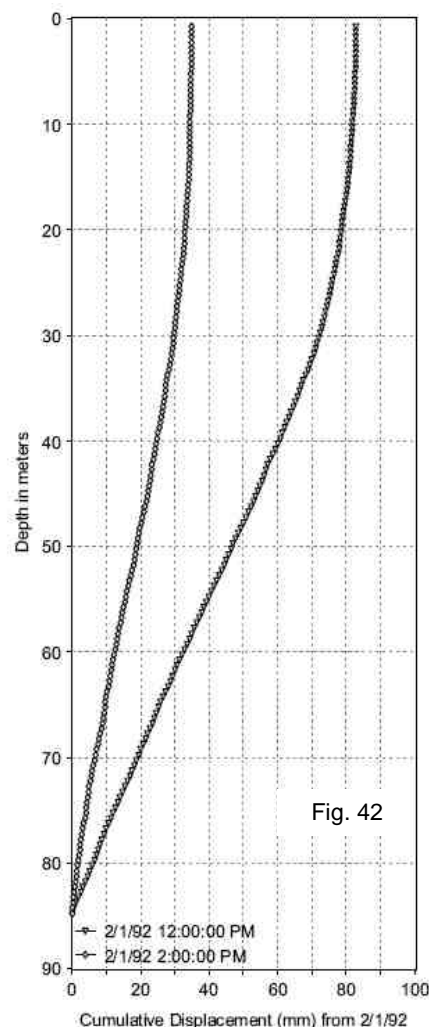
Teoricamente, i componenti meccanici della sonda sono calibrati in maniera tale che il servoaccelerometro relativo all'asse A possa oscillare soltanto nel piano A (Esempio: se le guide di un tubo inclinometrico fossero perfettamente allineate in direzione N-S, il servo-accelerometro dell'asse A durante la lettura delle guide A1-A3 dovrebbe oscillare esattamente sul piano N-S).

Nel caso in cui i componenti meccanici della sonda siano leggermente ruotati verso il piano B, il servoaccelerometro relativo all'asse A risulterà debolmente sensibile anche alle inclinazioni lungo l'asse B.

<u>Questa componente di inclinazione rilevata dal sensore relativo all'asse A costituisce l'errore di rotazione</u>.

Tale errore può, pertanto, essere definito come la componente di inclinazione sul piano ortogonale di una particolare lettura.

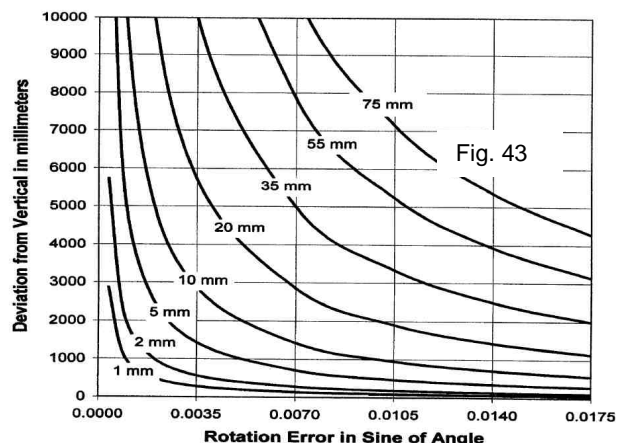
L'andamento tipico di un grafico di spostamento cumulativo affetto da questa tipologia di errore è riportato in figura 42 (Mikkelsen, 2003) e determina una falsa impressione di movimento, che potrebbe, invece, essere soltanto "apparente".

Fig. 42

Gli errori di rotazione assumono valori significativi quando si verifica la combinazione di due condizioni:

- Inclinazione significativa (> 2,5%) del tubo inclinometrico soprattutto lungo l'asse più prossimo all'ortogonalità rispetto alla direzione di massima pendenza del versante (che si assume essere grossomodo coincidente con la potenziale direzione di movimento della frana);
- disallineamento del servoaccelerometro dell'asse più prossimo al parallelismo con la direzione di massima pendenza del versante, verificatosi successivamente all'esecuzione della lettura di zero (se si fosse verificato precedentemente tale errore non verrebbe percepito).

Le cause del disallineamento possono essere molteplici, dall'usura del carrello e dei supporti delle ruote (problema che interessa tanto l'asse A che il B), a modificazioni nel movimento del sensore di misura dell'accelerometro solitamente causati da colpi o scossoni subiti dalla sonda ruote (anche in questo caso il

problema si ripercuote sia sull'asse A sia sul B), o, ancora, a cambiamenti di allineamento del servo-accelerometro, dovuti, ad esempio, a riparazioni della sonda con la sostituzione del sensore.

Solitamente il disallineamento del sensore presenta angoli che non superano il grado, tuttavia, anche in presenza di scostamenti con angoli estremamente ridotti, quando la deviazione rispetto alla verticale del tubo supera il metro, la magnitudo dell'errore di rotazione (vedere figura 43, da Mikkelsen, 2003) può raggiungere valori significativi, anche di svariati centimetri.

La correzione degli errori di rotazione deve sempre precedere quella della spiralatura, in quanto quest'ultima procedura comporta l'interpolazione dei dati relativi ai due assi, i cui contributi non potranno a posteriori essere più scorporati.

Allo stesso modo, anche la correzione relativa all'azimut della guida A rispetto al Nord dovrà essere introdotta solo successivamente all'individuazione e correzione di eventuali errori sistematici.

D.3 ERRORI DI POSIZIONAMENTO

Gli errori di posizionamento consistono semplicemente in variazioni della collocazione del punto di stazionamento della sonda all'interno di una installazione inclinometrica fra una lettura e la successiva.

La letteratura riporta che il posizionamento della sonda all'interno di uno stesso tubo, alle diverse profondità, dovrebbe avvenire con una tolleranza massima di ± 6 mm. In caso contrario, si verificherà un errore.
Tale errore si amplificherà nei tubi che presentino una marcata curvatura, mentre le installazioni rettilinee risultano meno sensibili a questo tipo di errore.

Gli spostamenti del punto di riferimento delle profondità di stazionamento della sonda sono dovuti a fattori materiali quali, ad esempio il taglio di una parte del tubo fuori terra successivamente all'acquisizione della lettura di zero, l'installazione della carrucola strozzacavo ad altezze da terra diverse fra una lettura e l'altra o l'utilizzo di carrucole diverse e con dimensioni non omogenee.

Altre cause di errori di posizionamento possono essere ricercate in cambiamenti di lunghezza del cavo, dovuti ad un suo naturale raccorciamento nel tempo o, più facilmente, alla sua sostituzione nel corso di una campagna di letture di una medesima installazione od alla sua riparazione.

Anche il verificarsi di assestamenti del terreno nel quale è collocata la colonna inclinometrica può determinare la compressione del tubo e, quindi, indurre errori di posizionamento, così come l'apparente accorciamento del tubo provocato dal deposito di detriti sul fondo dell'installazione.

Gli errori di posizionamento si manifestano su un'installazione caratterizzata da una marcata curvatura del tubo e determinano andamenti diversificati a seconda del tipo di deformazione del tubo.

Ad esempio installazioni caratterizzate da curvatura a "S" (vedi figura 44), potranno essere associate a grafici degli spostamenti cumulativi che presentano una "spanciatura" in corrispondenza della zona di flesso del tubo. Il verso della "spanciatura" è determinato dal tipo di errore di posizionamento commesso.

Nel caso di un tubo caratterizzato da questo tipo di andamento, sarà possibile riconoscere gli errori di posizionamento analizzando parallelamente il grafico della deviazione cumulativa e quello degli spostamenti cumulativi (vedi figura 44).

Nel caso in cui il grafico degli spostamenti cumulativi evidenzi un andamento simile a quello della curva A in figura 44, la sonda è stata posizionata più in basso rispetto ai riferimenti utilizzati per la lettura di zero.
Nel caso B, di fig. 44, invece, la sonda è stata posizionata più in alto.

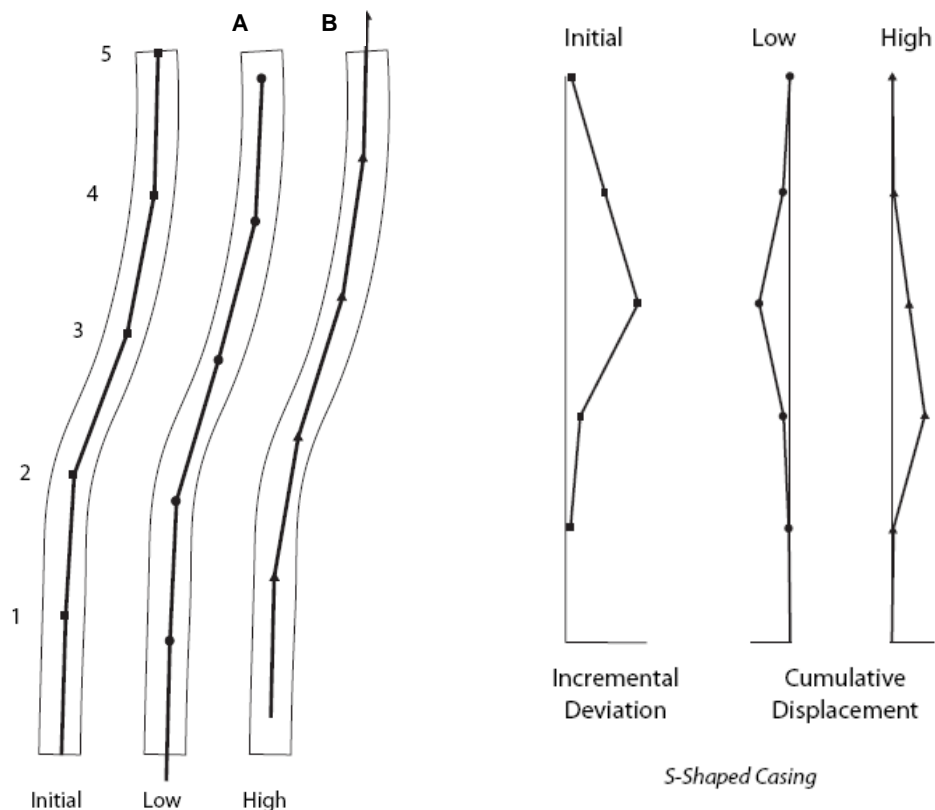



Fig. 44

Nel caso di installazioni caratterizzate da curvatura a "J" (vedi figura 43), eventuali errori di posizionamento potranno determinare grafici degli spostamenti cumulativi che manifestano una deviazione progressiva a partire da fondo foro, più marcata

nel tratto di tubo maggiormente curvato. Anche in questo caso, il verso della deviazione è determinato dal tipo di errore di posizionamento commesso.

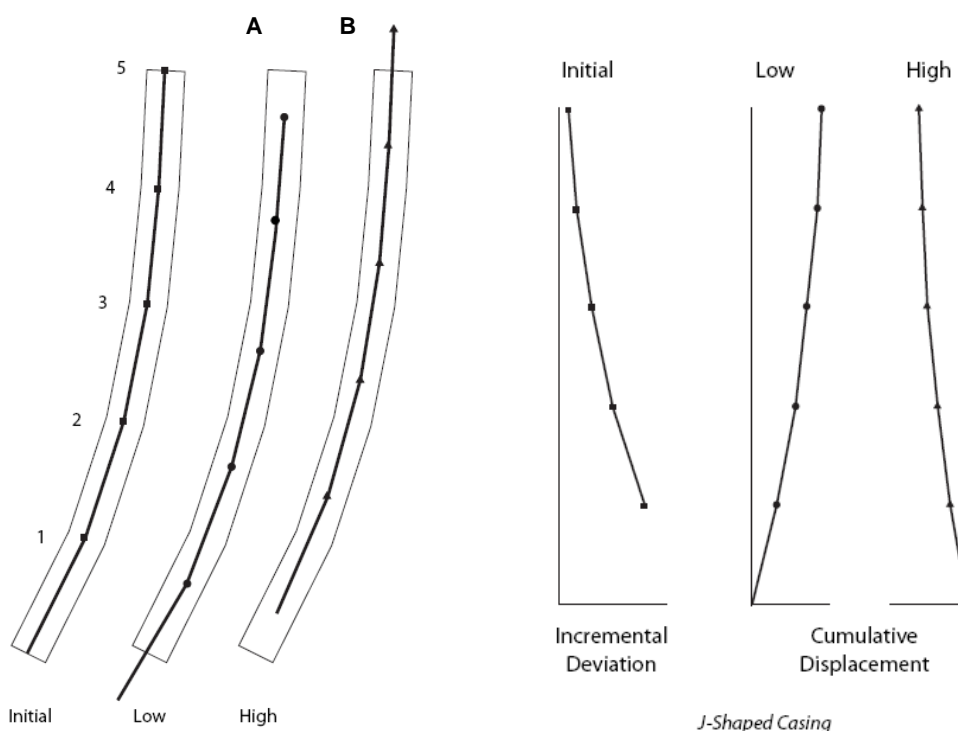



Fig. 45

Anche nel caso di fig. 45 il metodo per l'individuazione dell'errore si basa sul raffronto fra i grafici della deviazione cumulativa e degli spostamenti cumulati: se gli andamenti dei due diagrammi sono simili o speculari si potrà con buona sicurezza ipotizzare la presenza di un errore sistematico di posizionamento.

Una volta riconosciuta la presenza di questo tipo di errore, la correzione è possibile, ancorché laboriosa, imponendo un valore "noto" dell'errore di posizionamento. Nella gran parte dei casi, però, difficilmente si potrà risalire ad una credibile quantificazione dell'errore di posizionamento commesso, da utilizzare per la correzione, soprattutto quando esso è dovuto a un errore accidentale nella scelta del punto di riferimento o ad un raccorciamento del cavo a causa di una riparazione. In tali casi, eventuali errori di posizionamento potranno essere solo individuati.

Il modo migliore per evitare di incorrere in errori sistematici di questo tipo è quello di ricorrere alle buone pratiche di installazione della colonna inclinometrica già profusamente descritte nella prima parte della Direttiva al fine di evitare che il tubo si deformi ed assuma un assetto curvato. Tali cautele dovranno essere adoperate soprattutto nel caso di installazioni molto profonde, quando le forze di galleggiamento assumono grandezze significative, ed in sondaggi di largo diametro

L'errore di profondità (depth-control) è quello più difficile da correggere, ma deve sempre essere ricercato poiché produce, anche in terreni stabili, spostamenti

progressivi apparenti. Qualora individuato le valutazioni conseguenti devono essere svolte tenendone conto e minimizzandone l'influenza.

D.4 SPIRALATURA

E' buona pratica procedere alla verifica della spiralatura delle installazioni profonde, sicuramente maggiori di 30/40 metri, o di quelle in cui le tubazioni utilizzate per costituire la colonna non forniscono adeguate garanzie circa un preventivo controllo di fabbrica. In generale le specifiche di fabbrica indicano una spiralatura cumulativa variabile tra 0 a 5° per 30 metri di colonna.

In ogni caso il controllo e specialmente la correzione della spiralatura non deve essere considerata come una prassi di default, in particolare se non vi sono indicazioni di spostamento ed a maggior ragione in presenza di misure che indicano la presenza di potenziali errori.
Infatti tutte le operazioni di controllo e pulizia degli errori sistematici devono essere eseguite prima della correzione della spiralatura perché con tale procedura vengono "mescolate" le letture degli assi A (A1 – A3) e B (B1 – B3) che possono contenere errori sistematici, anche significativi.

La spiralatura non fornisce un contributo in termini di errore alla risultante della magnitudo di spostamento, per tale ragione la correzione della spiralatura non rientra tra le procedure di correzione degli errori sistematici ed è utile per una più precisa rappresentazione dei dati in quanto gli assi vengono ri-orientati in maniera corretta.

[9] Si precisa che la definizione di "azimut inclinometrico" differisce dall'azimut geografico che corrisponde all'angolo calcolato in senso orario di una determinata direzione e che assume sempre segno positivo e valore compreso tra 0° e 360°.